

心脏再同步化治疗反应性的预测因素研究进展

刘晓彤 芦颜美

(新疆医科大学第一附属医院心脏中心起搏电生理科, 新疆 乌鲁木齐 830054)

【摘要】 尽管心脏再同步化治疗在治疗电学失同步心力衰竭方面的有效性已被公认, 但一部分患者仍未能达到当前手术指征所预期的结果。为了实现个体化精准治疗, 同时减少医疗不必要的支出, 通过术前基线指标筛选出更适合接受心脏再同步化治疗的患者至关重要。现综合分析和总结心脏再同步化治疗反应性预测因素的研究进展, 为未来的研究和临床应用提供参考。

【关键词】 心脏再同步化治疗; 反应性; 预后; 预测因素

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2025.03.005

Predictors of Cardiac Resynchronization Therapy Response

LIU Xiaotong, LU Yanmei

(Department of Cardiac Pacing and Electrophysiology, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

【Abstract】 Although cardiac resynchronization therapy (CRT) is recognized for its effectiveness in treating electrically asynchronous heart failure, a notable group of patients fails to meet the anticipated outcomes based on current surgical indications. It is crucial to screen patients who are more suitable for CRT through preoperative baseline indicators in order to achieve personalized and precise treatment while reducing unnecessary medical expenses. We will comprehensively analyze and summarize the research progress on the predictors of CRT response, providing reference for future research and clinical applications.

【Keywords】 Cardiac resynchronization therapy; Response; Prognosis; Predictor

慢性心力衰竭 (chronic heart failure, CHF) 是诸多心脏问题的最终归宿, 其核心的病理生理变化是心肌重塑。这一过程常造成双心室的收缩不同步, 严重影响心脏泵血功能。尽管心脏再同步化治疗 (cardiac resynchronization therapy, CRT) 已被视为 CHF 的一线治疗手段, 但仍面临挑战。研究^[1]显示, 有 30%~40% 的患者对 CRT 无反应。因此, 精准地筛选患者对于提升 CRT 的疗效尤为关键。现阐述 CRT 反应性预测因素的研究进展, 为未来的研究和临床应用提供参考。

1 CRT 反应性定义

CRT 反应性目前无明确定义, 既往是通过临床终点、症状改善以及超声检查指标改善的长期和短期预后综合评定的。用于衡量治疗反应的指标多样, 且随访时间也不尽相同。Boidol 等^[2]发现, 纽约心功能分级临床指数 (特异性较高) 和左心室收缩末期容积指数 (敏感性较高) 两个指标在预测 CRT 术后 1 年发生主要不良心血管事件 (major adverse cardiovascular event, MACE) 上更为精准。为给这些指标确定最优

的阈值, 并设计出最有效的综合评估策略, 将会是一个挑战。同时需更加全面地认识“改善”状态的病理生理学机制。

另外, 常规定义 CRT 结局终点为二分类结局, 但大量研究提示 CRT 术后会进入一个“稳定期”, 表现为相关评价指标如左心室收缩末期容积 (left ventricular end-systolic volume, LVESV) 和左室射血分数 (left ventricular ejection fraction, LVEF) 在随访过程中无明显变化。近期有研究^[3]提示, 处于“稳定期”患者 (LVESV $\downarrow \leq 15\%$) 比“恶化组”患者 (LVESV 无变化) 的死亡率更低, 与“改善组”患者 (LVESV $\downarrow > 15\%$) 的死亡率相似, 这表明从长期效果来看, “稳定”与“改善”之间并无显著差异。因此需对“反应性”进行更精细地分类, 并通过大样本量研究加以验证。

2 反应性预测因素

2.1 性别和身高

大量研究发现, 女性是影响 CRT 疗效的一个重要因素, 而身高并未被视为一个关键变量。然而, Linde

等^[4]汇总了 5 项随机对照试验的数据,对 794 例女性和 2 702 例男性心力衰竭(心衰)患者进行了全因死亡率和/或心衰住院的复合终点评估。经多因素分析后发现,性别并非 CRT 疗效的独立预测因素。而是当 QRS 波群时限(QRS duration, QRSd)在 130~170 ms 时,女性患者的 CRT 治疗效果更为显著。同时该研究揭示了身高与 CRT 疗效之间的相关性。该研究将身高作为一个连续性变量进行了考量。调整多种协变量后,身高较矮的患者治疗效果更好(复合终点 $HR=1.019, P=0.013$)。值得注意的是,相较于男性(T1 vs T2 vs T3, T 代表根据身高中位数由低到高分三组,复合终点 $HR:0.53$ vs 0.74 vs 0.76 ;全因死亡 $HR:0.55$ vs 0.68 vs 0.79),身高普遍较矮的女性患者对 CRT 的反应更佳(更低的 50%患者 vs 更高的 50%患者,复合终点 $HR:0.48$ vs 0.57 ;全因死亡 $HR:0.55$ vs 0.57)。因此 Linde 等^[4]认为身高可作为代替变量解释性别对 CRT 预后的差异。

2.2 心房颤动

心房颤动(atrial fibrillation, AF)在 CHF 患者中是一种常见的伴随疾病,影响 15%~50%的 CHF 患者^[5]。在 SPARE 研究^[6]中,对接受 CRT 的 470 例患者中 126 例持续性 AF 患者进行了评估,结果显示 AF 患者在 1 年后的生活质量、6 分钟步行试验以及左心室逆向重塑方面与窦性心律患者有着相似的改善。但 AF 是 CRT 患者心衰死亡的独立预测因素($HR=5.4, 95\%CI 1.9\sim15.1$)。Dalggaard 等^[7]对 4 项临床试验的个体资料进行了分析,有 AF 病史的患者 CRT 后的心衰住院率和全因死亡率复合终点发生率($HR=0.78, 95\%CI 0.55\sim1.10$)与死亡率都无显著改变($HR=1.09, 95\%CI 0.70\sim1.74$)。由此可见 AF 对于 CRT 后获益的研究结果是矛盾的,可能与 AF 对双心室起搏比例的影响有关。Boriani 等^[8]研究发现,约 1/3 的患者出现难以控制的快速心室率,且过快心室率与双心室起搏比例呈负相关,也是心衰患者住院及死亡的独立预测因子。Jacobsson 等^[9]研究还发现,在 AF 患者中,双心室起搏比例<98%与死亡风险或心脏移植需求的增加有关($HR=1.9, 95\%CI 1.2\sim3.0$)。目前,缺乏足够的随机对照研究来探讨双心室起搏比例、AF 负荷以及心律监测数据之间的相互关系,AF 对 CRT 反应性的预测价值有待进一步确定。

2.3 糖尿病

CHF 患者中糖尿病(diabetes mellitus, DM)的患病率为 24%,在因心衰加重而住院的患者中,这一比例为 40%^[10]。PEACH 研究^[11]指出,亚洲 DM 患者的 CRT 反应性较低,且在心衰再住院、死亡率以及心室

逆向重塑方面的不良结果更为常见。Kahr 等^[12]研究发现,DM 与 CRT 后 MACE 的高发生率和 LVESV $\downarrow\geq 15\%$ 的心室逆向重塑的低发生率相关。在非缺血性心肌病患者中,DM 患者复合终点的发生风险更高。围手术期糖化血红蛋白水平控制在 7%以内的 DM 患者,其生存率显著提高($HR=0.36, 95\%CI 0.15\sim0.86$)^[13]。

2.4 共病负担

Zeitler 等^[14]对 MADIT-CRT 的患者进行了合并症负担与 CRT 反应性的研究发现,合并症负担大小如慢性肾功能不全、高血压、DM、冠状动脉疾病、房性心律失常、室性心律失常和卒中等,与左心室舒张末期容积(left ventricular end-diastolic volume, LVEDV)、LVESV、LVEF 和左心房容量改善呈负相关。另一项研究^[15]纳入了 8 项随机对照试验的数据,合并 AF、冠状动脉疾病、DM 及高血压不同共病数量的患者(0, 1~2, ≥ 3),无论是全因死亡还是因心衰再入院以及死亡的联合终点都不受合并症负担的影响。尽管基础状态影响患者的预后,但无论共病负担大小,都不影响 CRT 的决策,因为其对于无论有无共病患者的疗效是明确的。

2.5 真性左束支传导阻滞

除 QRSd 外,心电图中心 QRS 波群形态也是预测 CRT 反应性的一个重要指标。患有左束支传导阻滞(left bundle-branch block, LBBB)的患者在临床上的获益比非 LBBB 患者更大。然而,一些根据传统心电图标准被诊断为 LBBB 的患者可能实际上并无 LBBB,而是存在室内传导阻滞。心电图缺乏更加严格的诊断标准,可能会影响对 CRT 患者的准确筛选,这强调了对诊断标准进行精细化的必要性。2011 年 Strauss 等^[16]提出了“真性 LBBB”的概念。Hadjis 等^[17]的研究表明真性 LBBB 的患者在平均 44 个月的随访中,QRSd 缩短较常规 LBBB 明显[(20.9 ± 12.4) ms vs (6.7 ± 19.4) ms, $P<0.0001$],LVEF 显著增加(19.5 ± 10.2 vs $5.3\pm12.6, P<0.0001$),死亡率也显著下降($OR=0.49, 95\%CI 0.24\sim0.99, P=0.046$)。García-Seara 等^[18]研究表明,真性 LBBB 患者的 LVESV 和 LVEF 均得到改善,且死亡率、心衰住院风险低于非真性 LBBB 患者。真性 LBBB 的预测价值需更多的前瞻性研究验证。

2.6 碎裂 QRS 波群

碎裂 QRS 波群(fragmented QRS, fQRS)是指在常规体表心电图上,至少有两个连续导联 QRS 波群存在 ≥ 2 个 R 波或 R 波顶部或 S 波底部出现顿挫波,多数与心肌瘢痕及纤维化导致的电机械不同步有关^[19]。

fQRS 目前被认为与 CRT 反应性相关。一项荟萃分析^[20]共纳入 6 项观察性研究,结果表明 fQRS 可预测 CRT 的无反应性。不仅如此,Celikyurt 等^[21-22]研究进一步表明,存在 fQRS 的导联数量越多,预示着 CRT 反应性越差;相反,这样的导联数量越少可能意味着 CRT 的反应性越好。虽然 fQRS 作为 CRT 的预测指标显示出潜力,但现有研究主要集中于确立这种相关性,迫切需通过大规模的随机对照试验来进一步验证。

2.7 心脏磁共振成像

心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance, CMR)能揭示心肌组织特征、心脏功能和解剖结构,对于评价瘢痕的负荷、位置 and 不同步性,以及预测 CRT 的疗效反应都非常有效。一项多中心研究^[23]表明,心室间隔瘢痕具有 81% 的敏感性,能显著预测对 CRT 的无反应性。一项研究^[24]构建了瘢痕占比与心脏再同步化治疗除颤器(cardiac resynchronization therapy defibrillator, CRT-D)患者术后心源性猝死的 Cox 回归模型,瘢痕质量百分比每增加 1%,心源性猝死的风险平均增加 10% ($HR = 1.10$, 95% CI 1.06 ~ 1.15, $P < 0.01$)。另外心脏磁共振特征追踪技术可提示径向不同步,陈中丽等^[25]对非真性 LBBB 患者使用心脏磁共振特征追踪技术评估左心室应变率,结果表明该方法测量的室间隔周向及径向应变减低,可良好预测 CRT 反应性。Bilchick 等^[26]利用 CMR 刺激回声位移编码测量心脏周向应变不同步参数,并联合西雅图心衰模型对 CRT-D 患者预后的危险分层是有效的,这也为 CMR 的应用提供了新思路。

2.8 超声心动图

传统的超声心动图预测性指标是基于 M 型超声、脉冲多普勒或组织多普勒成像技术所获取的数据来构建的^[27]。PROSPECT 研究^[28]涵盖了来自 53 个中心的近 500 例患者,对 12 个传统超声心动图指标在预测 CRT 反应的有效性进行了深入分析,出人意料的结果显示,这些指标在识别 CRT 反应性上均未显示出预测价值。这一发现不仅挑战了超声心动图指标在预测 CRT 疗效方面的传统观点,而且对于重新评估这些诊断工具的有效性,具有重要的里程碑意义。

整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)最初被 Bertini 等^[29]提出,通过斑点示踪超声心动图测量评估左心室纵向主动缩短的指标。基线 GLS 值与患者对 CRT 有无反应性有关,较低的 GLS 值通常预示着对治疗的反应较差^[29]。Cameli 等^[30]在晚期心衰心脏移植患者左心室组织的病理学研究发现,GLS 与左心室的瘢痕和纤维化程度呈负相关。Khidir 等^[31]对 829 例接受 CRT 的 CHF 患者进行的研究显示,基线

GLS 值在 -5.8% 及以上的患者,其全因死亡、心脏移植和左心室辅助装置植入等综合终点的发生率最高 ($HR = 2.088$, 95% CI 1.555 ~ 2.804, $P < 0.001$)。Bazoukis 等^[32]的荟萃分析表明,CRT 反应性的基线 GLS 值明显更好,这在 CRT 反应性相似的亚组中得出一致结论。基线 GLS 水平与 CRT 的疗效及长期预后之间的相关性已得到广泛认可。尽管 GLS 在将来的临床应用中显示出巨大潜力,但为了确定 CRT 反应性的最佳临界值,仍需进行更多的研究。

2.9 生物标志物

对生物标志物的开发是基于心肌重塑的病理生理学机制,细胞凋亡、神经内分泌代谢、炎症反应、氧化应激和细胞外基质重组均参与重塑过程,虽然这些机制还不十分明确,但已有一些研究进行了初步的探索,包括 I 型前胶原羧基末端肽、N 末端脑钠肽前体、可溶性致癌抑制因子 2、半乳糖凝集素-3、白细胞介素、成纤维细胞生长因子-2 和髓过氧化物酶等^[33]。其次,目前的研究仅在较少样本量中验证,且如细胞外基质和信使 RNA 等关键生物标志物的获取存在一定难度,这不仅涉及到技术上的挑战,还可能因伦理和资源的限制而难以在更广泛的人群中进行研究。尽管存在这些挑战,生物标志物的研究无疑为 CRT 反应性的研究提供了新的视角和可能性。

3 预测模型

当前 CRT 指南推荐依然是基于 $LVEF \leq 35\%$ 、 $QRSd \geq 120$ ms、LBBB 选择适应证患者。越来越多的指标被证明对 CRT 反应性有预测价值,但无任何一个指标可独立预测 CRT 获益。因此,纳入多个因素构建预测模型或许是更好的方法。近年来,多个研究利用临床特征、检验指标、合并症、心电图、超声心动图、CMR 等指标构建不同的模型(表 1)^[34-40],而这些模型之间有显著的异质性,对于运用到实践有一定难度,需构建更便捷、更实用和更准确的预测模型。

4 展望

目前,对于 CRT 预后的预测因素体系庞杂,尚无单一指标能全面预测。未来研究需寻找更稳健的综合性指标,尤其是利用影像学检查对心脏机电不同步进行预判,扩大 CRT 手术适应证范围。同时,反应性的定义需进一步明确,以便更好地比较和解释研究结果。临床预测模型,尤其是基于人工智能的模型构建,可能是未来研究的方向,且最有可能运用于临床实践。受限于现在众多预测因素研究的不确定性,虽然它们已在许多小型试验中崭露头角,但组合类型是呈指数级增长的,这个问题或许可通过人工智能得以解决^[41]。此外,术中电极位置的优化、术后参数的优

化调整也是提升患者长期获益的重要方面。无论从 大提升 CRT 的使用疗效。
哪个阶段着手,通过多维度评价和综合干预,都将极

表 1 CRT 反应性预测模型

作者	样本量/ 例	终点事件	风险评分	评分内容	随访 时长	研究结果
Goldenberg 等 ^[34] (2011)	1 761	超声心动图反应:LVEDV ↓ > 10%, LVESV ↓ > 15%; 临床反应:发生心衰事件或死亡	MADIT-CRT 评分	女性(2分),non-ICM(2分),LBBB(2分),QRSd ≥ 150 ms(2分),既往因心衰住院(1分),LVEDV ≥ 125 mL/m ² (2分),LAV ≥ 40 mL/m ² (3分)	12 个月	高反应评分(≥9分)较低反应评分(0~4分)临床获益更大;反应评分(范围0~14)每增加1分,CRT-D的临床获益增加13%
Manlucu 等 ^[35] (2019)	1 798	全因死亡	MAGGIC 评分	3个风险组:低(0~16)、中(17~24)、高(>24);在线计算器: http://www.heartfailurerisk.org/	6 个月	高 MAGGIC 评分的患者生存率低于中、低评分的患者(73.0% vs 88.1% vs 96.8%, <i>P</i> <0.001)
Tokodi 等 ^[36] (2020)	1 510	全因死亡	SEMMELEWEIS-CRT 评分	基于随机森林机器学习方法构建风险分层系统,在线计算器: https://arguscognitive.com/crt	5 年	随访5年,AUC分别是0.768(95%CI 0.674~0.861, <i>P</i> <0.001)、0.793(95%CI 0.718~0.867, <i>P</i> <0.001)、0.785(95%CI 0.711~0.859, <i>P</i> <0.001)、0.776(95%CI 0.703~0.849, <i>P</i> <0.001)、0.803(95%CI 0.733~0.872, <i>P</i> <0.001)
Spinale 等 ^[37] (2019)	758	ΔLVESV ≥ 15 mL	Biomarker CRT 评分	sTNFr-II ≥ 7 090 pg/mL、sST2 ≥ 23 721 pg/mL、hsCRP ≥ 7 381 ng/mL、MMP-2 ≥ 982 000 pg/mL 分别记1分	12 个月	Biomarker CRT 评分越高反应性越差,较低的Biomarker CRT 评分加上较高的MADIT-CRT 评分将赋予CRT 反应性的高概率
Liang 等 ^[38] (2021)	725	LVEF ↑ > 10%	CRT 反应性	基于岭回归构建模型,在线计算器: http://www.crt-response.com/	12 个月	AUC=0.77, 特异度92%,敏感度54%
Maille 等 ^[39] (2022)	23 029	全因死亡	CRT-D Futility 评分	年龄(>61=1分,>69=2分,>75=3分),营养不良=2分,CKD=2分,肝病=2分,贫血=2分,DM=2分,AF=2分,LBBB=-1分,二尖瓣反流=2分,主动脉瓣狭窄=2分,心衰住院史=2分,肺水肿史=2分	12 个月	推导队列 AUC=0.716(95%CI 0.698~0.734);验证队列 AUC=0.692(95%CI 0.673~0.710)
Wouters 等 ^[40] (2023)	251 473	复合终点:死亡、左心室辅助装置或心脏移植	FactorECG	由变分自编码器和解码器组成的神经网络构建模型。在线计算器: https://crt.ecgx.ai	4 年	FactorECG 发现下外侧 T 波倒置、右侧心前区 S 波和 T 波振幅较小、心室率以及 PR 间期和 P 波持续时间增加是不良结局的重要预测因子;C 指数:0.69(95%CI 0.66~0.72)

注:non-ICM,非缺血性心脏病;LAV,左心房容量;ΔLVESV,左心室收缩末期容积变化率;sTNFr-II,可溶性肿瘤坏死因子受体 II 型;sST2,可溶性致癌抑制因子 2;hsCRP,高敏 C 反应蛋白;MMP-2,基质金属蛋白酶-2;CKD,慢性肾脏病。

参 考 文 献

[1] Birnie DH,Tang AS. The problem of non-response to cardiac resynchronization therapy[J]. *Curr Opin Cardiol*,2006,21(1):20-26.

[2] Boidol J, Šredniawa B, Kowalski O, et al. Many response criteria are poor predictors of outcomes after cardiac resynchronization therapy: validation using data from the randomized trial[J]. *Europace*,2013,15(6):835-844.

[3] Gold MR,Rickard J, Daubert JC, et al. Association of left ventricular remodeling with cardiac resynchronization therapy outcomes[J]. *Heart Rhythm*,2023,20(2):173-180.

[4] Linde C,Cleland JGF,Gold MR, et al. The interaction of sex,height,and QRS duration on the effects of cardiac resynchronization therapy on morbidity and mortality:an individual-patient data meta-analysis[J]. *Eur J Heart Fail*,2018,20(4):780-791.

[5] Gasparini M,Galimberti P. Atrial fibrillation and cardiac resynchronization therapy[J]. *Curr Opin Cardiol*,2018,33(1):1-6.

[6] Tolosana JM,Hernandez Madrid A,Brugada J, et al. Comparison of benefits and mortality in cardiac resynchronization therapy in patients with atrial fibrillation versus patients in sinus rhythm (Results of the Spanish Atrial Fibrillation and Resynchronization [SPARE] study) [J]. *Am J Cardiol*,2008,102(4):444-449.

[7] Dalggaard F,Fudim M,Al-Khatib SM, et al. Cardiac resynchronization therapy in patients with a prior history of atrial fibrillation:insights from four major clinical trials[J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*,2023,34(9):1914-1924.

[8] Boriani G,Gasparini M,Landolina M, et al. Incidence and clinical relevance of uncontrolled ventricular rate during atrial fibrillation in heart failure patients treated with cardiac resynchronization therapy[J]. *Eur J Heart Fail*,2011,13(8):868-876.

- [9] Jacobsson J, Reitan C, Carlson J, et al. Atrial fibrillation incidence and impact of biventricular pacing on long-term outcome in patients with heart failure treated with cardiac resynchronization therapy [J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2019, 19 (1):195.
- [10] Dei Cas A, Khan SS, Butler J, et al. Impact of diabetes on epidemiology, treatment, and outcomes of patients with heart failure [J]. *JACC Heart Fail*, 2015, 3(2):136-145.
- [11] Tan ESJ, Lim J, Chan SP, et al. Effect of Diabetes Mellitus on Cardiac Resynchronization Therapy and to Prognosis in Heart Failure (from the Prospective Evaluation of Asian With Cardiac Resynchronization Therapy for Heart Failure Study) [J]. *Am J Cardiol*, 2019, 124(6):899-906.
- [12] Kahr PC, Trenson S, Schindler M, et al. Differential effect of cardiac resynchronization therapy in patients with diabetes mellitus: a long-term retrospective cohort study [J]. *ESC Heart Fail*, 2020, 7(5):2773-2783.
- [13] Shah RV, Altman RK, Park MY, et al. Usefulness of hemoglobin A(1c) to predict outcome after cardiac resynchronization therapy in patients with diabetes mellitus and heart failure [J]. *Am J Cardiol*, 2012, 110(5):683-688.
- [14] Zeidler EP, Friedman DJ, Daubert JP, et al. Multiple comorbidities and response to cardiac resynchronization therapy: MADIT-CRT long-term follow-up [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 69(19):2369-2379.
- [15] Fudim M, Dalggaard F, Friedman DJ, et al. Comorbidities and clinical response to cardiac resynchronization therapy: patient-level meta-analysis from eight clinical trials [J]. *Eur J Heart Fail*, 2024, 26(4):1039-1046.
- [16] Strauss DG, Selvester RH, Wagner GS. Defining left bundle branch block in the era of cardiac resynchronization therapy [J]. *Am J Cardiol*, 2011, 107(6):927-934.
- [17] Hadjis A, Alturki A, Proietti R, et al. Predicting response to cardiac resynchronization therapy: use of strict left bundle branch block criteria [J]. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2019, 42(4):431-438.
- [18] García-Seara J, Iglesias Alvarez D, Alvarez Alvarez B, et al. Cardiac resynchronization therapy response in heart failure patients with different subtypes of true left bundle branch block [J]. *J Interv Card Electrophysiol*, 2018, 52(1):91-101.
- [19] Pietrasik G, Zareba W. QRS fragmentation: diagnostic and prognostic significance [J]. *Cardiol J*, 2012, 19(2):114-121.
- [20] 穆耶赛尔·玉苏普, 董震宇, 芦颜美, 等. 碎裂 QRS 波与心脏再同步化治疗无反应的关系: 荟萃分析 [J]. *临床心血管病杂志*, 2023, 39(3):220-225.
- [21] Celikyurt U, Karauzum K, Sahin T, et al. Association between resolution of fragmented QRS and response to cardiac resynchronization therapy [J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2015, 20(2):126-131.
- [22] Celikyurt U, Agacdiken A, Sahin T, et al. Number of leads with fragmented QRS predicts response to cardiac resynchronization therapy [J]. *Clin Cardiol*, 2013, 36(1):36-39.
- [23] Aalen JM, Donal E, Larsen CK, et al. Imaging predictors of response to cardiac resynchronization therapy: left ventricular work asymmetry by echocardiography and septal viability by cardiac magnetic resonance [J]. *Eur Heart J*, 2020, 41(39):3813-3823.
- [24] Fernández-Armenta J, Berrueto A, Mont L, et al. Use of myocardial scar characterization to predict ventricular arrhythmia in cardiac resynchronization therapy [J]. *Europace*, 2012, 14(11):1578-1586.
- [25] 陈中丽, 马璇, 徐楠, 等. 基于磁共振的室间隔应变对不符合真性左束支阻滞患者心脏再同步治疗反应的预测价值 [J]. *中华心律失常学杂志*, 2023, 27(5):397-405.
- [26] Bilchick KC, Auger DA, Abdishektaei M, et al. CMR DENSE and the Seattle Heart Failure Model inform survival and arrhythmia risk after CRT [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(4):924-936.
- [27] Yu CM, Fung WH, Lin H, et al. Predictors of left ventricular reverse remodeling after cardiac resynchronization therapy for heart failure secondary to idiopathic dilated or ischemic cardiomyopathy [J]. *Am J Cardiol*, 2003, 91(6):684-688.
- [28] Chung ES, Leon AR, Tavazzi L, et al. Results of the predictors of response to CRT (PROSPECT) trial [J]. *Circulation*, 2008, 117(20):2608-2616.
- [29] Bertini M, Ng ACT, Antoni ML, et al. Global longitudinal strain predicts long-term survival in patients with chronic ischemic cardiomyopathy [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2012, 5(3):383-391.
- [30] Cameli M, Mondillo S, Righini FM, et al. Left ventricular deformation and myocardial fibrosis in patients with advanced heart failure requiring transplantation [J]. *J Card Fail*, 2016, 22(11):901-907.
- [31] Khidir MJH, Abou R, Yilmaz D, et al. Prognostic value of global longitudinal strain in heart failure patients treated with cardiac resynchronization therapy [J]. *Heart Rhythm*, 2018, 15(10):1533-1539.
- [32] Bazoukis G, Thomopoulos C, Tse G, et al. Global longitudinal strain predicts responders after cardiac resynchronization therapy—A systematic review and meta-analysis [J]. *Heart Fail Rev*, 2022, 27(3):827-836.
- [33] Heggermont W, Auricchio A, Vanderheyden M. Biomarkers to predict the response to cardiac resynchronization therapy [J]. *Europace*, 2019, 21(11):1609-1620.
- [34] Goldenberg I, Moss AJ, Hall WJ, et al. Predictors of response to cardiac resynchronization therapy in the Multicenter Automatic Defibrillator Implantation Trial with Cardiac Resynchronization Therapy (MADIT-CRT) [J]. *Circulation*, 2011, 124(14):1527-1536.
- [35] Manlucu J, Sharma V, Koehler J, et al. Incremental value of implantable cardiac device diagnostic variables over clinical parameters to predict mortality in patients with mild to moderate heart failure [J]. *J Am Heart Assoc*, 2019, 8(14):e010998.
- [36] Tokodi M, Schwertner WR, Kovács A, et al. Machine learning-based mortality prediction of patients undergoing cardiac resynchronization therapy: the SEMMELWEIS-CRT score [J]. *Eur Heart J*, 2020, 41(18):1747-1756.
- [37] Spinale FG, Meyer TE, Stolen CM, et al. Development of a biomarker panel to predict cardiac resynchronization therapy response: results from the SMART-AV trial [J]. *Heart Rhythm*, 2019, 16(5):743-753.
- [38] Liang Y, Ding R, Wang J, et al. Prediction of response after cardiac resynchronization therapy with machine learning [J]. *Int J Cardiol*, 2021, 344:120-126.
- [39] Maille B, Bodin A, Bisson A, et al. Predicting outcome after cardiac resynchronization therapy defibrillator implantation: the cardiac resynchronization therapy defibrillator Futility score [J]. *Heart*, 2022, 108(15):1186-1193.
- [40] Wouters PC, van de Leur RR, Vessies MB, et al. Electrocardiogram-based deep learning improves outcome prediction following cardiac resynchronization therapy [J]. *Eur Heart J*, 2023, 44(8):680-692.
- [41] Nazar W, Szymanowicz S, Nazar K, et al. Artificial intelligence models in prediction of response to cardiac resynchronization therapy: a systematic review [J]. *Heart Fail Rev*, 2024, 29(1):133-150.

收稿日期: 2024-07-16