

心血管影像赋能精准医学——跨越结构、功能与分子层面的整合评估

陆敏杰

【关键词】 心血管影像学;精准医学;多模态成像;分子影像学;人工智能

【中图分类号】R445;R541;R-05 【文献标志码】D 【文章编号】1000-0313(2025)11-1346-02

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2025.11.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



近年来,随着多模态成像、人工智能与分子影像的快速发展,心血管影像已从传统的结构评估工具演变为集功能、组织学、代谢与细胞机制于一体的多维平台,逐步迈入精准医学的核心舞台。本期专题汇集六项高质量研究,涵盖从儿童肿瘤治疗后的心肌损伤识别、心肌纤维化量化,到房颤导管消融疗效预测、慢性缺血机制成像,再到系统性免疫疾病的右心室评估与自由呼吸心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)新技术验证,全面展现了心血管影像在诊断、评估与决策支持中的临床与科研价值。

$T_1\rho$ -mapping 技术在儿童肿瘤心肌毒性监测中的实践突破

四川大学华西第二医院的研究聚焦于儿童白血病患者在接受蒽环类药物化疗后,心肌损伤的早期识别问题。研究应用 $T_1\rho$ -mapping 技术与肌细胞外容积分数(extracellular volume fraction, ECV),系统评估了患儿在化疗四个阶段中的心肌组织变化,并结合对照组进行比较,验证了 CMR 在儿童心肌毒性识别中的敏感性和可重复性^[1]。该研究不仅填补了儿童群体心脏保护研究的空白,也为未来儿童肿瘤长期随访中纳入 CMR 监测提供了实践依据。

$T_1\rho$ -mapping 技术深化 HCM 纤维化-功能-结构三位联动机制

华中科技大学同济医院团队采用新一代无对比剂定量成像技术 $T_1\rho$ -mapping 对肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)患者的心肌纤维化进行了定量评估,并结合 CMR 特征追踪应变与左心室重构指数分析,系统揭示了纤维化程度与功能损伤及

心室重构之间的相关性^[2]。该研究不仅拓展了 $T_1\rho$ -mapping 在 HCM 中的应用场景,也为理解“纤维化-功能异常-结构改变”的病理链条提供了坚实影像学证据。

三维超声与应变评估提升房颤复发预测能力

阜外医院团队针对非梗阻型肥厚型心肌病(NOHCM)合并持续性房颤患者,评估了导管消融术前后左心房的结构与功能重构情况^[3]。研究表明,术前三维左房容积指数(LAVi)和储备应变(LASr)是房颤复发的独立预测因子。该研究强化了影像参数在术后随访与风险再分层中的应用,推动房颤管理从“节律控制”向“机制指导+动态监测”的个体化策略演进。

成纤维细胞活化蛋白抑制剂 PET/CT 在慢性缺血识别中的前瞻探索

首都医科大学附属北京朝阳医院开展的一项研究通过¹⁸F-成纤维细胞活化蛋白抑制剂(FAPI)正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(positron emission tomography/computer tomography, PET/CT)显像,评估慢性冠脉综合征(chronic coronary syndrome, CCS)患者的受损心肌^[4]。结果显示,与传统静息单光子发射计算机断层扫描(single photon emission computed tomography, SPECT)灌注成像相比,FAPI 显像在识别心肌受损范围及预测冠脉重度狭窄方面表现出更高敏感性。该研究首次将 FAPI 用于慢性缺血人群,开辟了以成纤维细胞活化为切入点的病理机制成像新路径,有望为 CCS 患者提供更个性化的血运重建策略支持。

免疫相关性心肌损伤的双心室影像学评估

中日友好医院研究团队聚焦抗 MDA5 抗体阳性皮肌炎患者的心脏受累情况,通过 CMR 对左、右心室的功能参数、 T_1/T_2 值、右心室长轴应变(right ventricular long-axis strain, RV-LAS)及重构指数进行全

作者单位:100037 北京,中国医学科学院北京协和医学院国家心血管病中心阜外医院磁共振影像科

作者简介:陆敏杰(1977—),男,浙江慈溪人,主任医师,主要从事心血管影像学研究。

基金项目:中国医学科学院阜外医院人工智能与信息化应用基金(2024-AI31)

面评估^[5]。结果提示该类患者虽无临床症状,但已存在显著的双心室功能下降和组织学异常,尤其右心室受累提示其潜在预后风险。该研究拓宽了免疫系统疾病与心肌病变之间的影像识别界限,强调了 CMR 在系统性疾病心脏并发症管理中的独特作用。

全自由呼吸 CMR 技术开启高效无障碍心功能评估新时代

在 CMR 流程与效率提升方面,阜外医院团队的另一项研究验证了压缩感知与运动校正技术结合的全自由呼吸 cine 成像在双心室功能评估中的可行性^[6]。研究显示,该方法在保持图像质量的同时,扫描时间从约 400 秒缩短至 150s,且各心功能参数与传统屏气序列高度一致。此举不仅打破了 CMR 检查对患者屏气配合的依赖,也为急重症患者、老年人及儿科人群的心功能评估创造了实际条件,是向“高质量+高效率+广适应性”迈进的标志性成果。

多模态融合:机制驱动的协同诊断路径

随着疾病谱的复杂化与评估需求的精细化,单一影像手段日益难以满足临床需求。本专题中 FAPI PET/CT 与 SPECT 的对比、CMR 与超声应变参数的整合应用,皆体现出多模态融合策略的潜力。未来,多模态协同(如 CMR+PET、CMR+CT 灌注、超声+影像组学)将推动疾病从“宏观观察”向“机制层级”转变,特别在识别弥漫性心肌病、微血管病变、免疫介导心脏损伤等领域表现出更强能力。

人工智能赋能:从影像定量走向疾病预测

人工智能(Artificial Intelligence, AI)正深度介入心血管影像的多个环节,包括结构识别、功能自动定量、纤维化定量评估、影像组学特征提取及预后建模等。AI 不仅可提升图像处理效率与标准化程度,还能通过深度学习模型建立从图像特征到临床结局的桥梁。例如,结合 T₁-mapping、心肌延迟强化与应变参

数的 AI 风险评分模型有望用于 HCM 猝死风险分层、心肌损伤进展预测等。在未来,AI 辅助心血管影像将不仅是“工具”,更是“决策引擎”。

展望未来:构建心血管影像的智能生态系统

从六项研究可以看出,心血管影像正从“静态测量”迈向“动态管理”,从“结构观察”跨入“机制推演”,从“结果判断”走向“个体预测”。展望未来,心血管影像将持续向以下方向拓展:①更早期识别:通过非造影成像与新型分子探针,实现亚临床阶段的损伤检测;②更深层机制:结合代谢成像、炎症成像与纤维化成像,揭示病变驱动因素;③更智能应用:依托 AI 与大数据,实现自动化分析、随访趋势监测与动态风险评估;④更广泛覆盖:通过自由呼吸 CMR、超低场 MRI 等技术降低门槛,推动影像惠及更多群体。

我们期待未来通过跨学科协作,构建起“技术-数据-模型-决策”一体化的心血管影像智能生态系统,为精准医疗提供强有力的视觉基础和决策支持。

参考文献:

- [1] 熊诗雨,黄薇,徐蓉,等.T₁-mapping 成像在儿童白血病联合化疗后心肌损伤中的应用[J].放射学实践,2025,40(11):1348-1355.
- [2] 冉玲平,向春林,唐大中,等.心脏磁共振 T₁ρ-mapping 技术定量评估肥厚型心肌病心肌纤维化及其与心肌应变-左心室重构的关联[J].放射学实践,2025,40(11):1356-1362.
- [3] 杨盼,唐亚捷,肖明虎,等.导管消融对非梗阻性肥厚型心肌病合并持续性房颤患者左房重构的作用[J].放射学实践,2025,40(11):1363-1369.
- [4] 涂斌,王佳慧,赵林,等.成纤维细胞活化蛋白抑制剂 PET/CT 显像识别慢性冠脉综合征受损心肌的研究[J].放射学实践,2025,40(11):1370-1374.
- [5] 张凌,蒲晓琪,戴金竹,等.抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者心脏受损的多参数磁共振研究[J].放射学实践,2025,40(11):1375-1382.
- [6] 刘乐乐,尹刚,蒋梦迪,等.全自由呼吸心脏磁共振检查之左、右心功能成像及分析[J].放射学实践,2025,40(11):1383-1389.

(收稿日期:2025-06-18)

T₁-mapping 成像在儿童白血病联合化疗后心肌损伤中的应用

熊诗雨, 黄薇, 徐蓉, 廖怡, 郭霞, 谢林均, 郭应坤

【摘要】 目的:采用心脏磁共振(CMR)定量技术 Native T₁-mapping 及心肌细胞外容积分数(ECV)分析白血病患者联合化疗后心肌组织改变的特征,并进一步探究导致心肌改变的影响因素。**方法:**纳入临床确诊为急性淋巴细胞白血病的患儿并接受了蒽环类药物化疗,根据临床危险程度将患者分为低危组和中高危组,并在 4 个治疗阶段(阶段 1: <32 周,阶段 2: 32~<55 周,阶段 3: 55~127 周,阶段 4: >127 周)采用 1.5T 磁共振进行多参数心肌评估;同时纳入 22 例健康儿童作为正常对照组。经过纳入和排除标准后 84 例白血病患者及 20 例正常对照组纳入研究。**结果:**所有患者左室射血分数均 >50%。低危组和中高危组白血病患儿的左室质量指数均显著低于正常对照组($P < 0.05$)。病例组的室间隔 Native T₁ 高于游离壁及正常组室间隔[(1058±56)ms vs. (1012±65) ms vs. (1016±46)ms, $P < 0.05$];正常组室间隔和游离壁 Native T₁ 值差异没有统计学意义[(1016±46)ms vs. (1024±55)ms, $P > 0.05$]。治疗阶段 3 的患者室间隔 Native T₁ 较正常对照组明显增高[(1073±52)ms vs. (1016±46)ms, $P < 0.05$]。治疗阶段 3 的患者 ECV 较阶段 2 的患者显著升高(30.6%±2.8% vs. 27.5%±5.0%, $P < 0.05$)。线性回归分析显示 Native T₁ 与检查年龄和治疗时间相关($\beta = -3.88$, $P = 0.02$; $\beta = 1.25$, $P = 0.03$), ECV 与治疗时间独立相关($\beta = 0.15$, $P < 0.001$)。阶段 3 及阶段 4 患儿中, ECV 与柔红霉素剂量均呈正相关($r = 0.38$, $P < 0.05$; $r = 0.55$, $P = 0.04$)。**结论:**对于接受联合化疗方案的白血病患者,室间隔区心肌损伤可能最明显,并且与治疗时间及柔红霉素累积剂量有关。因此,早期、规律监测白血病化疗儿童的心脏改变,对亚临床心脏毒性评估干预有重要意义。

【关键词】 急性淋巴细胞白血病;心脏磁共振;儿童;心脏毒性;心肌纤维化;纵向弛豫时间定量成像;细胞外体积分数

【中图分类号】 R445.2; R733.7; R541 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2025)11-1348-08

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2025.11.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



T₁-mapping for evaluation of chemotherapy-induced myocardial damage in children with leukemia

XIONG Shi-yu, HUANG Wei, XU Rong, et al. Department of Radiology, West China Second University Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

【Abstract】 Objective: To analyze the characteristics of myocardial tissue changes in children with leukemia after combined chemotherapy using cardiac magnetic resonance (CMR) quantitative techniques, including native T₁-mapping and myocardial extracellular volume fraction (ECV), and to further investigate the influencing factors leading to myocardial changes. **Methods:** Children clinically diagnosed with acute lymphoblastic leukemia who received anthracycline treatment were enrolled. The patients were divided into a low-risk group and a medium-high-risk group according to clinical risk levels. Multi-parameter myocardial assessment was performed using 1.5T CMR at four treatment phases (Stage 1: <32 weeks, Stage 2: 32~<55 weeks, Stage 3: 55~127 weeks, Stage 4: >127 weeks). Meanwhile, 22 healthy children were included as the normal control group. After passing the inclusion and exclusion criteria, 84 children with leukemia and 20 children in the normal control group were enrolled in the study. **Results:** All patients had a left ventricular ejection fraction (LVEF) greater than 50%. The left ventricular mass index (LVMI) in children with leukemia in both the low-risk group and the me-

作者单位: 610041 成都, 四川大学华西第二医院放射科/出生缺陷与相关妇科疾病教育部重点实验室(熊诗雨、徐蓉、廖怡、谢林均、郭应坤), 血液科(郭霞); 618400 四川德阳, 德阳市人民医院放射科(黄薇)

作者简介: 熊诗雨(2000—), 女, 四川井研县人, 硕士研究生, 主要从事心胸影像学研究。

通讯作者: 郭应坤, E-mail: gykpanda@163.com

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(82402249); 四川省自然科学基金青年项目(2025ZNSFSC1772)

dium-high-risk group was significantly lower than that in the normal control group ($P<0.05$). The native T_1 value of the interventricular septum in the case group was higher than that of the free wall and the normal control group [(1058±56)ms vs. (1012±65)ms vs. (1016±46)ms, $P<0.05$], while no difference in native T_1 values was observed between the interventricular septum and the free wall in the normal group [(1016±46)ms vs. (1024±55)ms, $P>0.05$]. The native T_1 value of the interventricular septum in patients at treatment stage 3 was significantly higher than that in the normal control group [(1073±52)ms vs. (1016±46)ms, $P<0.05$]. The ECV in patients at treatment stage 3 was significantly higher than that in patients at treatment stage 2 ($30.6\% \pm 2.8\%$ vs. $27.5\% \pm 5.0\%$, $P<0.05$). Linear regression analysis showed that native T_1 was correlated with the age at examination and treatment duration ($\beta = -3.88$, $P = 0.02$; $\beta = 1.25$, $P = 0.03$), and ECV was independently correlated with treatment duration ($\beta = 0.15$, $P < 0.001$). In children at stage 3 and stage 4, ECV was positively correlated with the dose of daunorubicin ($r = 0.38$, $P < 0.05$; $r = 0.55$, $P = 0.04$). **Conclusion:** In children with leukemia receiving combined chemotherapy regimens, myocardial damage in the interventricular septum area may be the most obvious, and it is related to the treatment duration and cumulative dose of daunorubicin. Therefore, early and regular monitoring of cardiac changes in children undergoing leukemia chemotherapy is of great significance for the evaluation and intervention of subclinical cardiotoxicity.

[Key words] Acute lymphoblastic leukemia; Cardiac magnetic resonance; Children; Cardiotoxicity; Myocardial fibrosis; T_1 -mapping; Extracellular volume fraction

急性淋巴细胞白血病(acute lymphoblastic leukemia, ALL)是儿童最常见的恶性肿瘤,在中国发病率约为 42.33/百万^[1-2]。联合化疗是其首选治疗方案,随着诊疗方案优化,ALL 儿童的 5 年总生存率上升至 90%^[3-4],但化疗药物带来的长期副作用,尤其是心肌毒性成为患者远期预后不良的主要原因。研究显示,年龄可能与肿瘤治疗相关心肌毒性的易感性有关,儿童或年轻患者与普通人对,在癌症治疗后短期内发生心衰相关死亡的风险明显增加^[5]。因此,及时识别亚临床阶段心肌改变,能够及时启动干预,优化治疗策略,或是改善患者长期生存质量的重要策略^[9]。

在白血病联合化疗方案中,柔红霉素(蒽环类药物)、地塞米松、环磷酰胺等药物可能通过不同的途径和机制造成心肌损伤,最终出现不可逆的心力衰竭甚至死亡,其中蒽环类药物所致的心肌毒性最常见^[6-7],但由于其疗效显著且其心脏毒性呈剂量依赖性,临床上在密切关注其心脏毒性的同时仍在使用的^[8]。2022 年欧洲心脏病协会发布了最新的肿瘤心脏病学诊疗管理规范,但主要基于成人研究,儿童白血病治疗后心肌损伤改变仍不明确^[9]。

超声心动图作为心脏评估的一线工具,具备实时性、无辐射、性价比高的特点,但对于早期或细微心脏损伤的敏感性不足,且受角度依赖性和操作者经验影响大,重复性较差,而心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)作为一种无创影像检查手段,具有多参数、多序列成像特点,对早期识别亚临床心肌损伤敏

感性较高^[10]。 T_1 -mapping 技术作为一种新兴的定量评估技术,对于肿瘤治疗相关心肌损伤方面的探测还没有很明确,它能够量化心肌组织特征^[11],增强前的 Native T_1 可以检测心肌纤维化、心肌水肿等变化,增强后的增强后 T_1 -mapping(Post T_1 -mapping)技术可以计算心肌细胞外容积分数(extracellular volume fraction, ECV),作为特异性弥漫性心肌纤维化评价指标,能够反映细胞外间质的纤维化情况^[12-15]。在针对成人肿瘤治疗相关心脏毒性的前瞻性研究发现,接受蒽环类药物化疗的患者 Native T_1 值明显升高,并以疑似或发生治疗相关心功能异常的患者升高程度最为明显^[16-17]。儿童免疫状态、器官功能恢复能力及对治疗药物反应情况等与成人均存在一定差异,儿童的机体状态,心脏的大小、重量、容积、及形态等都会发生变化,与成人差异较大^[18],其是否存在相似的变化过程尚不明确。

因此,本研究针对 ALL 儿童患者,通过心脏磁共振 T_1 -mapping 评价心肌纤维化情况,旨在阐释联合化疗后 ALL 患儿早期心肌损伤改变特征并进一步探索其影响因素,为 ALL 治疗后心肌毒性的早期监测时间窗提供科学依据,旨在指导后续治疗并改善远期预后。

材料与方法

1. 研究对象

本研究纳入标准:①年龄 ≤ 18 岁;②2020 年 10

月—2023 年 5 月在四川大学华西第二医院血液科诊断为急性淋巴细胞白血病并采用中国儿童癌症协会 2015 方案(CCCG-ALL-2015)^[19]中的标准进行临床危险度分型,并计划按照标准的化疗方案进行联合化疗的患者。排除标准:①合并其他任何类型的心血管疾病或者先天性心脏病,如心肌病、房室间隔缺损、肥厚型心肌病等;②有磁共振检查的禁忌症,如体内有磁性植入物、幽闭恐惧症等;③对比剂禁忌症,如既往有严重过敏史、肾功能不全等;④图像质量不佳,无法达到后处理要求的患儿。最终有 84 例患儿被纳入本研究。同时本研究还根据病例组年龄区间,纳入了与病例组年龄匹配的正常健康儿童 22 例,作为正常对照组。所有正常组儿童来源于志愿者临床招募,均无心血管家族史及磁共振检查禁忌症,均完成心脏磁共振检查,排除标准为 CMR 图像质量差。经排除标准后 20 例正常对照组纳入本研究。该研究方案华西二院医院伦理委员会的批准(伦理号 2022288)。所有参与者都提供了书面知情同意书。

2. 图像采集

采用 Philips Achieva 1.5T 磁共振扫描仪及 16 通道体线圈进行 CMR 检查。检查前,所有受试者都接受了呼气末屏气训练,检查中运用呼吸心电门控触发采集信号。对于能够配合呼吸的儿童,采用屏气模式采集图像,即在呼气末时屏气完成图像获取,而针对无法配合呼吸的儿童,则通过给予水合氯醛镇静剂,或提前进行睡眠剥夺等手段,使其在平稳呼吸状态下接受检查,此情形采用自由呼吸模式采集图像,并借助膈肌导航技术以提高图像质量^[20]。检查时,受试者均采取仰卧位,头先进方位。CMR 扫描方案包括电影序列、T₁-mapping、Post-T₁-mapping。T₁-mapping 序列扫描步骤:①Native T₁-mapping 序列:在注射对比剂之前,采用改良 Look-Locker 反转恢复(modified Look-Locker inversion recovery, MOLLI)序列进行采集,采集范围包括左心室三层短轴层面(基底段、心中间段及心尖段)及四腔心层面。成像参数:TR 2.71 ms, TE 1.11 ms, 翻转角 35°, 层厚 6 mm, 矩阵 139×192, 视野 280 mm×224 mm, 采集模式为 5(3)3。在呼气末屏气期间采用心电门控进行图像采集。②Post-T₁-mapping 序列:经静脉注射对比剂钆布醇注射液(Gadovist, Bayer Healthcare Pharmaceuticals, Berlin, Germany), 剂量 0.1 mL/kg, 注射对比剂之后 5~8 分钟进行 Post-T₁-mapping 扫描, 参数与 Native T₁-mapping 序列保持一致, 根据患者近期血常规中的血细胞比容(HCT)计算 ECV。

3. 处理后分析

所有 CMR 图像由两名经验丰富的放射科医生采

用专业后处理软件 Cvi42(Circle Cardiovascular Imaging Inc., Calgary, Canada)进行后处理。心功能分析基于 CMR 电影序列,选取短轴位电影图像调入心功能分析模块,使用 AI 自动识别左心室舒张末期和收缩末期的心内膜及心外膜轮廓,少部分 AI 识别不佳的情况进行手动调整。心内外膜勾画时不包括肌小梁和乳头肌。完成勾画后软件自动计算得到左心室功能指标。除 LVEF 外,其余参数均采用经体表面积(body surface area, BSA)校正后的相对值(即质量或容积/BSA)进行标准化处理,包括左室收缩末期容积指数(left ventricular end-systolic volumes, LVES-Vi)、左室舒张末期容积指数(left ventricular end-diastolic volumes index, LVEDVi)、左室每搏输出量指数(left ventricular stroke volume index, LVSVi)和左室质量指数(left ventricular mass index, LVMi)。CMR 心功能测量示意图见图 1。测量受试者心肌 T₁ 信号时,选取 T₁-mapping 心脏横轴面图像,调入软件的 T₁-mapping 分析模块,在中间段 T₁-mapping 图上绘制心内膜和心外膜边界,避开左室血池和心外膜脂肪的干扰,并采取感兴趣区域的定量方法获得左室游离壁和室间隔的 T₁-mapping 测量值^[21]。通过在血池中定义一个感兴趣区来获得血池 T₁ 值。计算 ECV 需要的血细胞比容是在 CMR 静脉置管时获得的^[22], ECV 计算如下: $ECV = (1 - \text{血细胞比容}) \times [(1/T_1 \text{ 心肌对比剂后} - 1/T_1 \text{ 心肌对比剂前}) / (1/T_1 \text{ 血液对比剂后} - 1/T_1 \text{ 血液对比剂前})]$ ^[23]。代表性的 T₁-mapping 及 ECV 图见图 2。

4. 统计学分析

采用 SPSS 27.0 软件 IBM SPSS(version 27.0, IBM SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 及 GraphPad Prism(GraphPad version 10.4.1, San Diego, CA) 离线软件包进行统计学分析。分类变量采用频数和百分比表示,组间比较采用卡方检验或 Fisher 确切概率



图 1 CMR 心功能测量示意图。

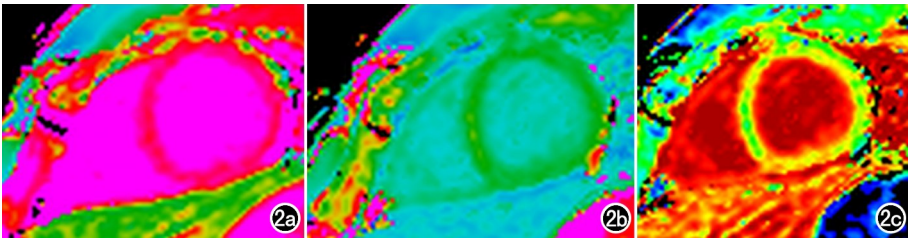


图 2 a)Native T₁ 伪彩图;b)Post T₁ 伪彩图;c)ECV 伪彩图。

法。连续变量采用 Shapiro-Wilk 检验评价正态性,采用 Levene's 检验评价方差齐性,正态分布采用均值±标准差表示,非正态分布采用中位数(四分位数间距)表示。符合正态分布及方差齐性则采用独立样本 *t* 检验(两组)或单因素方差分析(One-way ANOVA)(三组及以上)比较组间差异,如果差异具有统计学意义进一步通过 Bonferroni 检验进行组间两两比较。若不满 足方差齐性则采用 Wilcoxon 秩和检验或 Kruskal-Wallis 检验。采用 Pearson 或 Spearman 检验进行相关性分析。单因素相关性分析 *P* < 0.10 纳入多元线性回归模型进行多因素分析。统计学分析 *P* 值均为双尾,以 *P* < 0.05 为差异具有统计学意义。

结 果

1.病例组临床资料及与正常对照组基线资料比较
84 例白血病患者确诊年龄为 6.1(4.0~10.1)岁。临床症状包括:发热 57 例(67.9%),面色苍白 27 例(32.1%),瘀斑瘀点 17 例(20.2%),鼻衄 13 例

(15.5%),颈部淋巴结增大 8 例(9.5%),心电图异常(房性早搏、室性早搏、T 波低平或倒置、电轴偏移、P-R 间期延长) 19 例(22.6%),脓毒血症 9 例(10.7%),肿瘤裂解综合征 4 例(4.8%)。根据临床标准将患者分为低危组(33 例,39.3%)和中高危组(51 例,60.7%)。采用的化疗药物为:长春新碱/长春地辛 66 例(78.6%),柔红霉素 84 例(100%),环磷酰胺 75 例(89.3%),阿糖胞苷 84 例(100%),培门冬酶/门冬酰胺 79 例(94.0%)。采用的心脏保护药物为:右丙亚胺/右雷佐生 76 例(89.2%),辅酶 Q10 52 例(62.2%)。根据治疗阶段分为 <32 周(阶段 1,8 例,9.5%);32~<55 周(阶段 2,28 例,33.3%);55~127 周(阶段 3,30 例,35.7%),>127 周(阶段 4,18 例,21.4%)。

病例组与正常对照组的年龄、性别、体重及 BSA 差异没有统计学意义(*P* > 0.05,表 1)。

2.正常组和病例亚组的基线资料及心功能参数比较

低危组、中高危组及正常对照组基线资料和心功能参数对比结果见表 2,低危组和中高危组的 LVMi 均显著低于正常对照组(31.4 ± 5.5g/m²、32.2 ± 6.2g/m² vs. 39.8 ± 5.5 g/m²),三组的体重、性别、BSA、LVEF、LVEDVi、LVESVi、LVSVi 差异没有统

表 1 病例组及正常对照组一般资料

基线资料	正常组 (n=20)	病例组 (n=84)	χ ² /Z 值	P 值
年龄/岁	9.7(8.0~10.9)	8.0(5.4~11.8)	1.16	0.25
男性/例(%)	10(50.0)	55(65.5)	1.65	0.20
身高/cm	135.5(125.5~145.1)	120.0(103.6~139.0)	2.30	<0.05*
体重/kg	30.0(23.3~33.8)	25.0(19.5~35.0)	1.09	0.28
BMI/kg/m ²	15.9(14.2~17.2)	18.2(16.0~21.0)	3.12	<0.01*
BSA/m ²	1.1(0.9~1.2)	1.0(0.8~1.3)	0.73	0.47

注: * *P* < 0.05

表 2 正常对照组及不同亚组的基线资料及心功能参数对比

基线资料及心功能参数	正常组 (n=20)	低危组 (n=33)	中高危组 (n=51)
检查年龄/岁	9.7(8.0~10.9)	6.5(5.0~8.7)*	9.9(6.2~13.6) [#]
男性/例(%)	10(50.0)	23(69.7)	32(62.7)
身高/cm	133.7±14.1	112.7±16.0*	128.3±25.2 [#]
体重/kg	30.0(23.3~33.8)	23.4(19.1~25.8)	28.0(20.0~41.0)
BMI/kg/m ²	15.9(14.2~17.2)	18.9(16.4~21.7)*	17.6(15.2~20.2)*
BSA/m ²	1.1(0.9~1.2)	0.9(0.8~1.0)	1.0(0.8~1.5)
LVEF/%	62.5±4.7	64.4±5.0	63.3±4.6
LVEDVi/mL/m ²	68.4±12.9	65.2±10.5	64.0±14.0
LVESVi/mL/m ²	25.7±6.3	23.9±5.7	23.6±6.5
LVMi/g/m ²	39.8±5.5	31.4±5.5*	32.2±6.2*
LVSVi/mL/m ²	42.7±8.5	41.3±6.9	39.8±8.8

注: * vs. 正常组,*P* < 0.05; [#] vs. 低危组,*P* < 0.05

计学意义($P>0.05$)。

3.正常组、病例组及亚组的 Native T₁ 对比

正常组和病例组的 Native T₁ 对比结果见图 3,病例组的 Native T₁ 在室间隔升高最明显[(1058±56)ms vs. (1016±46)ms, $P<0.05$],病例组整体 Native T₁ 均值虽然高于正常组,但差异没有统计学意义。同时,病例组室间隔的 Native T₁ 值也明显高于游离壁[(1058±56)ms vs.(1012±65)ms, $P<0.01$],而正常组的室间隔和游离壁 Native T₁ 值差异没有统计学意义[(1016±46)ms vs. (1024±55)ms, $P>0.05$]。

低危组和中高危组的室间隔 Native T₁ 均高于正常对照组,差异有统计学意义($P<0.05$),整体及游离壁 Native T₁ 在各组间差异均无统计学意义(表 3)。

4.不同治疗阶段的基线资料及心功能参数比较

正常对照组及不同治疗阶段的患者的基本资料及心功能参数对比结果见表 4。不同治疗阶段的患者年龄差异无统计学意义。LVEF 在整个联合化疗过程中没有明显的下降,且与正常对照组差异无统计学意义,均处于正常值范围。阶段 1、2、3、4 的 LVMi 对比正常对照组都有明显下降。正常组与不同治疗阶段的体重、BSA、LVEDVi、LVESVi、LVSVi 差异无统计学意义($P>0.05$)。

5.不同治疗阶段的 Native T₁ 及 ECV 对比

4 个治疗阶段的患者以及正常对照组的 Native T₁ 及 ECV 比较见表 5。在阶段 3 的患者中,室间隔 Native T₁ 高于正常对照组,差异有统计学意义[(1073±52)ms vs. (1016±46)ms, $P<0.05$];游离壁

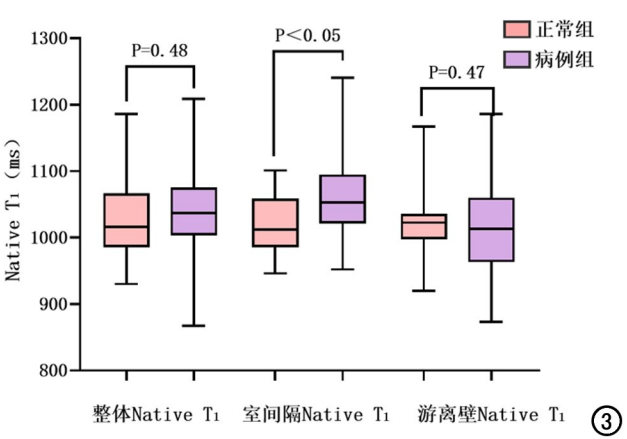


图 3 正常对照组和病例组的 Native T₁ 对比。

Native T₁ 在不同治疗阶段的患者中以及与正常对照组之间差异无统计学意义。

病例组患者中有 72 例接受了增强 CMR 检查,阶段 1 有 7 例,阶段 2 有 22 例,阶段 3 有 28 例,阶段 4 有 15 例。阶段 3 的患者 ECV 显著高于阶段 2 的患者(30.6%±2.8% vs. 27.5±5.0, $P<0.05$),不同治疗阶段的 LVEF、LVMi、室间隔 Native T₁、ECV 对比及变化趋势见图 4。

6.柔红霉素剂量与 ECV 相关性

CMR 检查时白血病患者 ECV 与累积柔红霉素剂量没有相关性($r=0.18$, $P=0.13$,图 5a)。在阶段 3 及阶段 4 患儿中,ECV 与柔红霉素剂量均呈正相关($r=0.38$, $P<0.05$; $r=0.55$, $P=0.04$,图 5b,c)。

7.白血病患者左室 Native T₁ 及 ECV 升高的线性回归分析

表 3 正常组和病例亚组的组间 Native T₁ 对比

Native T ₁	正常组 (n=20)	低危组 (n=33)	中高危组 (n=51)
整体 Native T ₁ /ms	1029±63	1044±70	1036±48
室间隔 Native T ₁ /ms	1016±46	1067±59 [*]	1052±53 [*]
游离壁 Native T ₁ /ms	1024±55	1019±75	1008±57

注: * vs. 正常组, $P<0.05$

表 4 正常对照组、不同治疗阶段患者基线资料及心功能参数对比

基线资料及心功能参数	正常组 (n=20)	阶段 1 (n=8)	阶段 2 (n=28)	阶段 3 (n=30)	阶段 4 (n=18)
检查年龄/岁	9.5±2.6	8.5±3.9	9.2±3.5	8.4±4.1	8.3±3.6
男性/例(%)	10(50.0)	6(75.0)	17(60.7)	21(70.0)	11(61.1)
身高/cm	133.7±14.1	126.1±19.0	130.1±22.0	120.0±23.8	111.9±23.0 [*]
体重/kg	29.8±9.2	26.1±8.7	29.8±12.7	29.1±13.1	27.3±11.6
BMI/kg/m ²	16.3±2.5	16.0±1.5	17.1±3.7	19.2±2.6 ^{* &}	21.2±3.0 ^{* &}
BSA/m ²	1.0±0.2	1.0±0.3	1.1±0.4	1.1±0.4	1.1±0.4
LVEF/%	62.5±4.7	65.6±5.1	63.2±5.7	64.0±3.3	63.2±5.2
LVEDVi/mL/m ²	68.4±12.9	56.3±7.2	62.4±13.6	67.5±13.3	66.4±10.5
LVESVi/mL/m ²	25.7±6.3	20.1±5.2	22.6±5.8	24.8±6.5	25.3±6.1
LVMi/g/m ²	39.8±5.5	28.9±6.3 [*]	32.1±6.0 [*]	32.4±6.4 [*]	32.1±4.9 [*]
LVSVi/mL/m ²	42.7±8.5	36.2±3.6	38.6±9.7	42.8±7.6	41.1±6.7

注: * vs. 正常组, $P<0.05$; # vs. 阶段 1, $P<0.05$; & vs. 阶段 2, $P<0.05$

表 5 正常对照组、不同治疗阶段患者 Native T₁ 及 ECV 对比

Native T ₁ 及 ECV	正常组 (n=20)	阶段 1 (n=8)	阶段 2 (n=28)	阶段 3 (n=30)	阶段 4 (n=18)
整体 Native T ₁ /ms	1029±63	996±47	1034±72	1059±41	1035±48
室间隔 Native T ₁ /ms	1016±46	1025±63	1054±61	1073±52 [*]	1055±46
游离壁 Native T ₁ /ms	1024±55	983±65	997±73	1030±54	1020±62
ECV(%)	—	26.6±4.4 (n=7)	27.5±5.0 (n=22)	30.6±2.8 [#] (n=28)	28.9±2.8 (n=15)

注：^{*} vs.正常组， $P<0.05$ ；[#] vs.阶段 2， $P<0.05$ 。

回归分析纳入临床相关的指标：年龄、性别、体表面积、检查时治疗时间以及 CMR 相关参数(LVEF、LVMi)，结果显示 Native T₁ 与年龄和检查时治疗时间相关($\beta=-3.88, P=0.02$; $\beta=1.25, P=0.03$,表 6)，ECV 与检查时治疗时间独立相关($\beta=0.15, P<0.001$,表 7)。

表 6 白血病患者左心室 Native T₁ 的多元线性回归(n=84)

变量	单因素		多因素 ^a	
	β	P 值	β	P 值
性别	-2.17	0.87	—	—
LVEF	-0.03	0.99	—	—
LVMi	-0.27	0.80	—	—
柔红霉素累积剂量	0.03	0.73	—	—
BSA	-9.48	0.54	—	—
年龄	-3.47	0.04	-3.88	0.02
检查时治疗时间	1.10	0.06	1.25	0.03

注：^a单因素相关性分析 $P<0.10$ 的因素纳入多元线性回归模型。

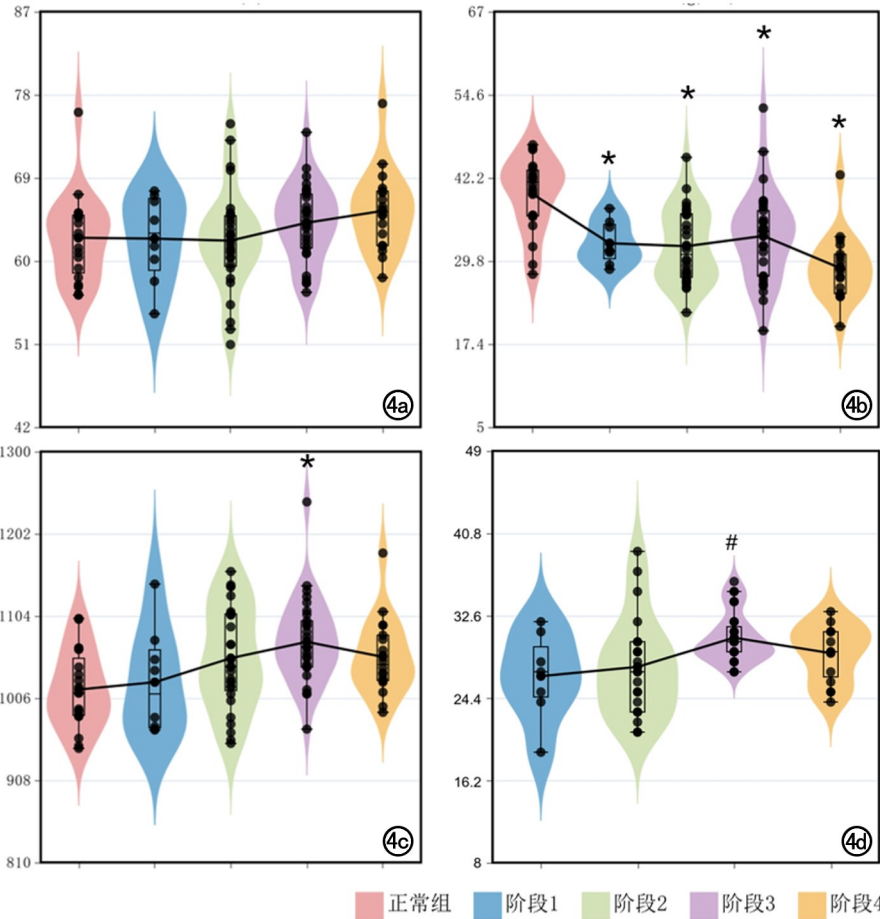


图 4 不同治疗阶段的 CMR 参数对比。a)LVEF 对比;b)LVMi 对比;c)Native T₁ 对比;d)ECV 对比。^{*} vs.正常组， $P<0.05$ ；[#] vs.阶段 2， $P<0.05$ 。

表 7 白血病患者左室 ECV 的单因素线性回归(n=72)

变量	β 值	P 值
性别	0.07	0.95
LVEF	-0.01	0.91
LVMi	0.01	0.90
柔红霉素累积剂量	0.01	0.15
年龄	-0.14	0.29
BSA	-0.59	0.61
检查时治疗时间	0.15	<0.001

讨 论

ALL 作为儿童中最常见的恶性肿瘤，化疗所致心肌毒性与患儿远期预后密切相关，但目前主要针对成人进行研究，对儿童的相关研究较少。因此，早期评估白血病患者联合化疗后心肌组织的特征改变可能具有重要作用。本研究首次采用 1.5T CMR T₁-mapping

技术定量评价 ALL 患儿心肌纤维化，结果发现，LVEF 正常时 Native T₁ 以及 ECV 出现升高，其中室间隔改变最明显，并与治疗阶段及药物剂量累积有关。

作为无创性评估指标，Native T₁ 值能够对化疗相关心脏损伤的早期心肌病变识别。本研究发现病例组整体 Native T₁ 均值略高于对照组，但差异无统计学意义，而室间隔 Native T₁ 明显升高。这与最近一项猪模型的研究结果一致，该研究使用蒽环类药物 12 周后，病例组室间隔 Native T₁ 值高于对照组[(1168±28) ms vs. (1134±8) ms, $P=0.009$]^[24]。此外，在针对成人肿瘤治疗相关心脏毒性的前瞻性研究发现，接受蒽环类药物化疗的患者 Native T₁ 值治疗后明显升高，并以疑似或发生治疗相关心功能异常的患者升高程度最为明显^[16-17]。本研究在化疗第 4 阶段，病例组 Native T₁ 值较化疗第 3 阶段稍降低，与正常组无显著差异，这与 Hu 等^[25] 研究

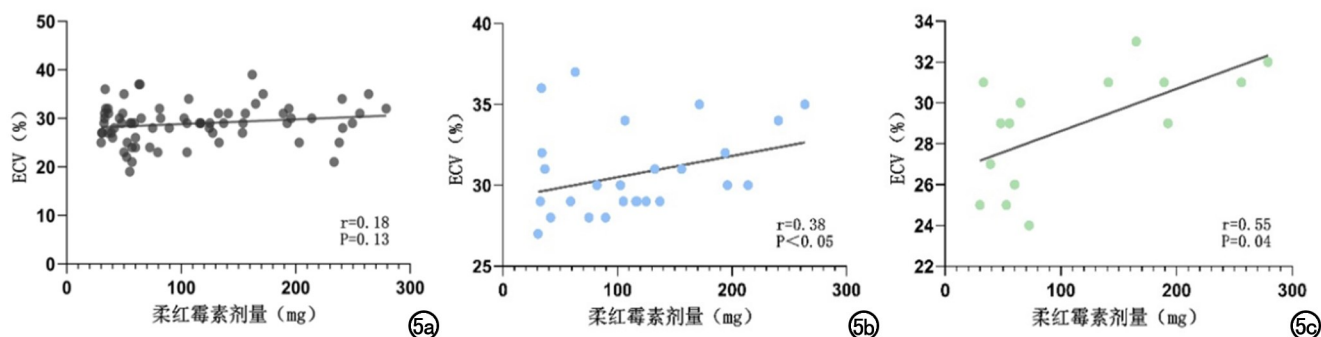


图 5 a)ECV 与累积柔红霉素剂量相关性;b)ECV 与第 3 治疗阶段柔红霉素剂量相关性;c)ECV 与第 4 治疗阶段柔红霉素剂量相关性。

有相似之处,该研究使用蒽环类药物诱导的兔心脏毒性模型发现,Native T_1 在第 4 周时即明显高于基线 $[(1469.4 \pm 67.5) \text{ ms vs. } (1396.5 \pm 79.2) \text{ ms}, P = 0.010]$,却在 12 周的时候恢复到了基线水平,表现为暂时性的变化,表明蒽环类药物导致的心肌毒性可能在不同周期出现不同的变化。

由于儿童处于生长发育阶段,与成人差异明显,且基于体表面积调整的化疗药物暴露量较低,相较于成人心血管风险因素较低。儿童肿瘤心脏相关毒性研究较少,一项针对儿童癌症幸存者的研究显示^[26],病例组在末次蒽环类药物化疗中位时间 9.8 年后,整体 Native T_1 值与对照组无显著差异 $(1007 \pm 32 \text{ ms vs. } 998 \pm 36 \text{ ms})$,本研究在治疗第 4 阶段,整体 Native T_1 值在病例组和对照组之间没有明显差异,这可能提示了儿童具有较强的恢复潜力。但本研究针对局部 T_1 -mapping 分析显示病例组室间隔 Native T_1 显著高于对照组及自身游离壁,提示联合化疗导致的心肌毒性可能在心肌不同部位产生不同的影响,这与此前的研究结果相似^[27]。

ECV 能够识别弥漫性纤维化,克服了传统 LGE 只能检测局灶性纤维化的不足^[28-30],且重复性和可靠性更高^[31]。在 Nakata 等^[24]的小型猪试验中,与对照组相比,蒽环类药物治疗组的猪心肌 ECV 增加,且在 12 周时,患有癌症治疗相关心功能不全(CTRCD)组显著高于无 CTRCD 组 $(27.4\% \text{ vs. } 24.5\%)$;另外, Wadi 等^[26]的研究显示,即使是在结束化疗约 10 年后,儿童肿瘤幸存者中同样存在病例组较正常组 ECV 升高的情况。本研究发现,在白血病患者接受联合化疗后,心肌 ECV 在治疗的第 3 阶段显著升高,提示心肌纤维化可能跟治疗时间有关;并且,Native T_1 中也呈现相似情况,提示对应的心肌组织改变可能逐渐发生于化疗中晚期。本研究显示,治疗时间是 ECV 的独立影响因子,且与 Native T_1 值相关。此前针对接受蒽环类药物治疗儿童 ALL 研究发现,即便使用低

至中等剂量的蒽环类药物,也可能导致进行性心功能障碍^[32]。因此,持续规律的心脏监测不可或缺,CMR 定量参数为早期识别亚临床改变提供了可靠手段。

本研究存在一定的局限性:首先,本研究样本量较小、监测时间较短,需要更大的样本量和更长的观察周期以明确其对远期预后的作用;其次, T_1 值与 ECV 参考值在不同 MR 扫描条件(磁场强度、采集序列、设备型号)上存在差异,因此,本研究中的参考范围仅提供给了相同场强和扫描仪的参考。

综上所述, T_1 -mapping 技术能够定量评估急性淋巴细胞白血病患儿的心肌组织特征,并在室间隔心肌纤维化改变更明显;在化疗第 3 阶段,Native T_1 及 ECV 显著上升,提示心肌纤维化改变可能随时间进展。因此,早期、规律监测白血病化疗儿童的心脏改变,对亚临床心脏毒性的评估和干预有重要意义。

参考文献:

- [1] Ni X, Li Z, Li X, et al. Socioeconomic inequalities in cancer incidence and access to health services among children and adolescents in China: A cross-sectional study[J]. *Lancet*, 2022, 400(10357): 1020-1032.
- [2] Ivanov AV, Alecsa MS, Popescu R, et al. Pediatric acute lymphoblastic leukemia emerging therapies-from pathway to target[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(5): 4661.
- [3] Tran TH, Hunger SP. The genomic landscape of pediatric acute lymphoblastic leukemia and precision medicine opportunities[J]. *Semin Cancer Biol*, 2022, 84: 144-152.
- [4] Ehrhardt MJ, Leerink JM, Mulder RL, et al. Systematic review and updated recommendations for cardiomyopathy surveillance for survivors of childhood, adolescent, and young adult cancer from the International Late Effects of Childhood Cancer Guideline Harmonization Group[J]. *Lancet Oncol*, 2023, 24(3): e108-e120.
- [5] Bhagat A, Kleiner ES. Anthracycline-induced cardiotoxicity: causes, mechanisms, and prevention[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2020, 1257: 181-192.
- [6] Rocca C, De Francesco EM, Pasqua T, et al. Mitochondrial determinants of anti-cancer drug-induced cardiotoxicity[J]. *Biomedicines*, 2022, 10(3): 520.

- [7] Yu X, Yang Y, Chen T, et al. Cell death regulation in myocardial toxicity induced by antineoplastic drugs[J]. *Front Cell Dev Biol*, 2023, 11: 1075917.
- [8] Kourek C, Touloupaki M, Rempakos A, et al. Cardioprotective strategies from cardiotoxicity in cancer patients: A comprehensive review[J]. *J Cardiovasc Dev Dis*, 2022, 9(8): 259.
- [9] Lyon AR, López-Fernández T, Couch LS, 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.
- [10] Houard L, Militaru S, Tanaka K, et al. Test-retest reliability of left and right ventricular systolic function by new and conventional echocardiographic and cardiac magnetic resonance parameters[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(10): 1157-1167.
- [11] 陈林, 白维, 邹庆, 等. T₁-mapping 心脏 MRI 在特纳综合征中的应用价值[J]. *放射学实践*, 2024, 39(12): 1605-1613.
- [12] 张艳, 庞明杰, 陈浩强, 等. 心脏磁共振组织追踪技术定量评价心肌运动参数在肥厚型心肌病心源性猝死风险评估中的应用价值[J]. *放射学实践*, 2024, 39(11): 1472-1480.
- [13] Mohamed AA, Elmancy LY, Abulola SM, et al. Assessment of native myocardial T₁-mapping for early detection of anthracycline-induced cardiotoxicity in patients with cancer: A systematic review and meta-analysis[J]. *Cardiovasc Toxicol*, 2024, 24(6): 563-575.
- [14] Han D, Lin A, Kuronuma K, et al. Cardiac computed tomography for quantification of myocardial extracellular volume fraction: A systematic review and meta-analysis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2023, 16(10): 1306-1317.
- [15] Bakhshi H, Michelhaugh SA, Bruce SA, et al. Association between proteomic biomarkers and myocardial fibrosis measured by MRI: the multi-ethnic study of atherosclerosis[J]. *EBio Medicine*, 2023, 90: 104490.
- [16] Li X, Shen H, Peng Y, Miao Z, et al. The additional value of myocardial T₁ρ mapping to T₁ and T₂ mapping for predicting subsequent cancer therapy-related cardiac dysfunction in breast cancer patients who received anthracyclines with/without trastuzumab[J]. *Eur J Radiol*, 2024, 181: 111755.
- [17] Harries I, Biglino G, Ford K, et al. Prospective multiparametric CMR characterization and MicroRNA profiling of anthracycline cardiotoxicity: A pilot translational study[J]. *Int J Cardiol Heart Vasc*, 2022, 43: 101134.
- [18] 彭军. 儿童心脏发育与心电图概述[J]. *临床心电学杂志*, 2024, 33(2): 141-145.
- [19] 中国抗癌协会小儿肿瘤专业委员会急性淋巴细胞白血病 2015 多中心研究协作组. CCCG-ALL-2015 方案多中心临床报告[J]. *中华儿科杂志*, 2022, 60(10): 1002-1010.
- [20] Hundley WG, Bluemke DA, Bogaert J, et al. Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) guidelines for reporting cardiovascular magnetic resonance examinations[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2022, 24(1): 29.
- [21] Schulz-Menger J, Bluemke DA, Bremerich J, et al. Standardized image interpretation and post-processing in cardiovascular magnetic resonance-2020 update: Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR): Board of Trustees Task Force on Standardized Post-Processing[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020, 22(1): 19.
- [22] Arheden H, Saeed M, Higgins CB, et al. Measurement of the distribution volume of gadopentetate dimeglumine at echo-planar MR imaging to quantify myocardial infarction: comparison with ^{99m}Tc-DTPA autoradiography in rats[J]. *Radiology*, 1999, 211(3): 698-708.
- [23] Moon JC, Messroghli DR, Kellman P, et al. Myocardial T₁-mapping and extracellular volume quantification: a Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) and CMR Working Group of the European Society of Cardiology consensus statement[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15(1): 92.
- [24] Nakata K, Kucukseymen S, Cai X, et al. Cardiovascular magnetic resonance characterization of myocardial tissue injury in a miniature swine model of cancer therapy-related cardiovascular toxicity[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2024, 26(1): 101033.
- [25] Hu Y, Ma P, Chen L, et al. Multi-parameter cardiac magnetic resonance imaging detects anthracycline-induced cardiotoxicity in rabbits model[J]. *Heliyon*, 2023, 9(11): e21845.
- [26] Mawad W, Mertens L, Pagano JJ, et al. Effect of anthracycline therapy on myocardial function and markers of fibrotic remodeling in childhood cancer survivors[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(4): 435-442.
- [27] Dong Y, Yang D, Han Y, et al. Age and gender impact the measurement of myocardial interstitial fibrosis in a healthy adult chinese population: A cardiac magnetic resonance study[J]. *Front Physiol*, 2018, 9: 140.
- [28] Li S, Zhou D, Sirajuddin A, He J, et al. T₁-mapping and extracellular volume fraction in dilated cardiomyopathy: A prognosis study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(4): 578-590.
- [29] Treibel TA, Fridman Y, Bering P, et al. Extracellular volume associates with outcomes more strongly than native or post-contrast myocardial T₁[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(1 Pt 1): 44-54.
- [30] Diao KY, Yang ZG, Xu HY, et al. Histologic validation of myocardial fibrosis measured by T₁-mapping: A systematic review and meta-analysis[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18(1): 92.
- [31] Muscogiuri G, Suranyi P, Schoepf UJ, et al. Cardiac magnetic resonance T₁-mapping of the myocardium: Technical background and clinical relevance[J]. *J Thorac Imaging*, 2018, 33(2): 71-80.
- [32] Rathe M, Carlsen NL, Oxhøj H. Late cardiac effects of anthracycline containing therapy for childhood acute lymphoblastic leukemia[J]. *Pediatr Blood Cancer*, 2007, 48(7): 663-667.

(收稿日期: 2025-03-28 修回日期: 2025-06-27)

· 心血管影像学专题 ·

心脏磁共振 $T_1\rho$ -mapping 技术定量评估肥厚型心肌病心肌纤维化及其与心肌应变-左心室重构的关联

冉玲平, 向春林, 唐大中, 夏黎明, 黄璐

【摘要】 目的:采用心脏磁共振 $T_1\rho$ -mapping 技术定量评估肥厚型心肌病(HCM)患者的心肌纤维化,并分析其与心肌应变及左心室(LV)重构的相关性。**方法:**前瞻性纳入行心脏磁共振检查的 40 例 HCM 患者,并纳入 15 例健康志愿者作对照组,测量 LV 心肌整体 $T_1\rho$ 值、最大 $T_1\rho$ 值、初始 T_1 值、LV 应变参数(包括纵向、周向、径向应变及应变率)以及 LV 重构指数(LVRI)。HCM 患者按 LV 有无延迟钆增强(LGE)分为 LGE 阳性组和 LGE 阴性组。采用独立样本 t 检验和单因素方差分析比较组间差异,采用 Pearson/Spearman 相关分析评估各参数间相关性。**结果:**HCM 组的 LVRI(1.3 ± 0.3 vs. 0.6 ± 0.1)、LV 整体 $T_1\rho$ 值[(46.8 ± 2.2) ms vs. (42.8 ± 1.6) ms]、最大 $T_1\rho$ 值[(51.0 ± 2.8) ms vs. (46.0 ± 1.1) ms]和初始 T_1 值[(1303.0 ± 39.2) ms vs. (1242.5 ± 26.2) ms]均显著高于对照组(P 均 < 0.05),LV 心肌应变和应变率均低于对照组(P 均 < 0.05)。LGE 阳性组和 LGE 阴性组的整体 $T_1\rho$ 值、最大 $T_1\rho$ 值、LVRI 均显著高于对照组(P 均 < 0.05)。左心室整体 $T_1\rho$ 值、最大 $T_1\rho$ 值、初始 T_1 值与心肌应变和应变率、LVRI 有一定相关性(P 均 < 0.05)。**结论:** $T_1\rho$ -mapping 技术可定量评估 HCM 心肌纤维化程度,其参数变化与心肌应变受损及左心室重构密切相关,为 HCM 的早期诊断和病情评估提供了新的影像学依据。

【关键词】 心脏磁共振成像;肥厚型心肌病; $T_1\rho$ -mapping;心肌应变;左心室重构

【中图分类号】 R445.2;R542.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2025)11-1356-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2025.11.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quantitative evaluation of myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy using cardiac magnetic resonance $T_1\rho$ -mapping and its association with myocardial strain-left ventricular remodeling RAN Ling-ping, XIANG Chun-lin, TANG Da-zhong, et al. Department of Radiology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

【Abstract】 Objective: To quantitatively evaluate myocardial fibrosis in patients with hypertrophic cardiomyopathy (HCM) using cardiac magnetic resonance $T_1\rho$ -mapping technology, and to analyze its correlation with myocardial strain and left ventricular (LV) remodeling. **Methods:** Forty HCM patients undergoing cardiac magnetic resonance examination were prospectively enrolled, and 15 healthy volunteers were included as the control group. The LV global $T_1\rho$ value, maximum $T_1\rho$ value, native T_1 value, LV strain parameters (including longitudinal, circumferential, radial strain and strain rate), and LV remodeling index (LVRI) were measured. HCM patients were divided into late gadolinium enhancement (LGE) positive group and LGE negative group according to the presence or absence of LGE. Independent sample t test and one-way analysis of variance were used to compare the differences between groups, and Pearson/Spearman correlation analysis was used to evaluate the correlation between parameters. **Results:** In the HCM group, LVRI (1.3 ± 0.3 vs. 0.6 ± 0.1), LV global $T_1\rho$ value [(46.8 ± 2.2) ms vs. (42.8 ± 1.6) ms], maximum $T_1\rho$ value [(51.0 ± 2.8) ms vs. (46.0 ± 1.1) ms] and native T_1 value [(1303.0 ± 39.2) ms vs. (1242.5 ± 26.2) ms] were all significantly higher than those in the control group (all $P < 0.05$), while LV myocardial strain and strain rate were significantly lower than those in the control group (all $P < 0.05$). The global $T_1\rho$ value, maximum $T_1\rho$ value and LVRI in

作者单位: 430030 武汉, 华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科

作者简介: 冉玲平(1994-), 女, 青海海东人, 博士研究生, 主治医师, 主要从事心血管及胸部影像诊断工作。

通讯作者: 黄璐, E-mail: tj_lhuang@hust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(82272109)

both LGE positive group and LGE negative group were significantly higher than those in the control group (all $P < 0.05$). The LV global $T_1\rho$ value, the maximum $T_1\rho$ value, and native T_1 value showed certain correlations with myocardial strain, strain rate, and LVRI (all $P < 0.05$). **Conclusion:** The $T_1\rho$ -mapping technique can quantitatively evaluate the degree of myocardial fibrosis in HCM. The changes in its parameters are closely related to impaired myocardial strain and LV remodeling, providing a new imaging basis for the early diagnosis and condition assessment of HCM.

【Key words】 Cardiac magnetic resonance imaging; Hypertrophic cardiomyopathy; $T_1\rho$ -mapping; Myocardial strain; Left ventricular remodeling

肥厚型心肌病 (hypertrophic cardiomyopathy, HCM) 是一种以心肌细胞肥大、左心室壁厚度增加和纤维化为主要病理特征的遗传性心肌病^[1,2]。随着病程进展, HCM 患者可发生心力衰竭、恶性心律失常甚至心源性猝死^[3,4]。因此, 对 HCM 患者进行早期诊断和准确评估对改善患者预后至关重要。心脏磁共振成像 (cardiovascular magnetic resonance, CMR) 因其多参数、多序列的成像特点, 能够全面评估 HCM 患者的心脏结构、功能和组织特征变化, 已成为临床诊断和危险分层的重要工具。

在心肌纤维化评估方面, 延迟钆增强 (late gadolinium enhancement, LGE) 成像是目前临床检测局灶性纤维化的标准方法, 但对早期弥漫性纤维化的敏感性有限。定量成像技术如 T_1 -mapping 和细胞外容积分数 (extracellular volume, ECV) 虽然可以实现纤维化的定量评估, 但其测量结果容易受到心肌水肿、脂肪浸润等多种因素的影响。近年来发展的内源性对比 $T_1\rho$ -mapping 技术通过检测水分子与胶原蛋白的相互作用, 能够更特异地反映心肌纤维化程度, 特别是在弥漫性纤维化的早期检测方面展现出独特优势, 并已被应用于 HCM 检测心肌纤维化^[5-7]。然而, 现有关于 $T_1\rho$ -mapping 在 HCM 中的研究缺乏对其与心肌力学改变和心室重构之间内在联系的深入探讨。

CMR 特征追踪技术可以准确测量心肌应变参数, 这些参数能够敏感地反映 HCM 患者早期的心肌收缩功能异常^[8-10]。左心室重构指数 (left ventricular remodeling index, LVRI) 通过整合左心室质量和容积的变化, 为心室重构提供了量化指标。但目前尚未有研究系统探讨 $T_1\rho$ -mapping 参数与心肌应变和心室重构指标之间的关联, 这限制了对 HCM 患者“心肌纤维化-功能异常-结构重构”这一病理生理过程的全面理解。基于此, 本研究拟应用心脏磁共振 $T_1\rho$ -mapping 技术定量评估 HCM 患者心肌纤维化程度, 并探讨其与心肌应变和左心室重构的相关性, 旨在揭示 $T_1\rho$ -mapping 参数与心肌功能和结构改变的内在联系, 为 HCM 的早期诊断和危险分层提供新的影像学依据。

材料与方法

1. 研究对象

本研究采用前瞻性队列设计, 连续性纳入 2024 年 5 月—2024 年 12 月来本院进行 CMR 检查的 HCM 患者。HCM 的诊断标准: 超声心动图或 CMR 显示舒张末期最大室壁厚度 ≥ 15 mm 或有明确家族史患者室壁厚度 ≥ 13 mm, 并排除其它引起室壁肥厚的心血管疾病或系统性疾病^[1]。排除标准包括: ①患者有任何磁共振检查禁忌症或无法耐受磁共振检查; ②冠状动脉造影或 CT 显示冠状动脉狭窄 $> 50\%$; ③其他导致左心室心肌肥厚的疾病; ④患者有严重心律不齐等因素导致图像质量差, 无法满足图像后处理分析或临床诊断要求。

本研究最终纳入了 40 例 HCM 患者, 男性 18 例, 女性 22 例, 年龄 $14 \sim 75 (46.4 \pm 16.7)$ 岁。另外, 纳入 15 名没有心血管危险因素或心血管相关临床症状的健康志愿者作为对照组, 男性 7 名, 女性 8 名, 年龄 $22 \sim 64 (38.7 \pm 14.3)$ 岁。本研究经华中科技大学同济医学院附属同济医院伦理委员会批准 (审批号: TJ-IRB20230914), 所有患者均签署知情同意书。

2. 检查方法

本研究所有参与者在 Philips Ingenia Elition X 3.0T 磁共振扫描仪上进行 CMR 检查, 采用 32 通道体线圈和心电门控以及呼吸门控技术。检查前对所有患者进行呼气末屏气训练。扫描方案包括: ①常规电影序列, 包括短轴、两腔、三腔和四腔长轴层面, 均重建 25 个期相。短轴序列共采集 9~10 层图像覆盖整个左心室, 扫描参数: 视野 (FOV) $320 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$, 重复时间 (TR) 2.77 ms, 回波时间 (TE) 1.39 ms, 翻转角 (FA) 45° , 矩阵 160×165 , 层厚 8 mm。② T_1 -mapping 采用改良的 Look-Locker 反转恢复 (modified look locker inversion recovery, MOLLI) 序列, 于心动周期舒张末期进行增强前和增强后 T_1 -mapping 成像, 扫描层面同短轴电影序列, 扫描参数: FOV $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, TR 2.24 ms, TE 1.04 ms, FA 20° , 矩阵 152×150 , 层厚 8 mm。③ $T_1\rho$ -mapping 序列自旋锁定频率

为 300 Hz, 扫描层面同短轴电影序列, 扫描参数: FOV 300 mm×300 mm, TR 2.38 ms, TE 1.19 ms, FA 45°, 矩阵 160×165, 层厚 8 mm。④HCM 患者注射 Gd-DT-PA 对比剂莫迪司(博莱科信谊, 剂量 0.2 mmol/kg) 10~15 min 后进行 LGE 和增强后 T₁-mapping 成像, LGE 扫描层面同短轴电影序列。LGE 扫描参数: FOV 300 mm×300 mm, TR 4.47 ms, TE 2.2 ms, FA 15°, 矩阵 200×187, 层厚 8 mm。

3. 图像分析

采用软件 Cvi42 v.5.3(Circle Cardiovascular Imaging Inc., Calgary, Canada) 进行左心室定量功能和应变分析, 由两名具有 7 年以上 CMR 诊断经验的医师独立操作。

人工智能自动识别勾画舒张末期和收缩末期的左心室(left ventricle, LV)心内膜和心外膜轮廓, 由测量的医师逐层查看, 轮廓识别不准确时进行手动调整, 使其与室壁厚度保持一致。心室腔容积包含心内膜肌小梁和心室乳头肌。然后计算左心室容积和功能参数, 并通过体表面积进行标准化, 包括左心室舒张末期容积指数(left ventricular end-diastolic volume index, LVEDVi)、左心室收缩末期容积指数(left ventricular end-systolic volume index, LVESVi)、左心室每搏输出量指数(left ventricular stroke volume index, LVSVi)、左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、左心室心脏指数(left ventricular cardiac index, LVCI)和左心室舒张末期质量指数(left ventricle end-diastolic mass index, LVEDMi)。记录左心室舒张末期最大室壁厚度值。左心室重构指数(left ventricular remodeling index, LVRI)定义为左心室舒张末期心肌质量与左心室舒张末期容积的比值。

心肌应变分析使用软件的特征追踪模块, 在舒张末期自动勾画短轴和长轴层面电影图像左心室心内膜和心外膜轮廓, 心内膜和心外膜轮廓的调整同心功能分析, 然后在整个心动周期进行轮廓追踪, 运行程序后软件自动计算出左心室应变及应变率。左心室整体应变包括整体径向峰值应变(global peak radial strain, GRS)、整体周向峰值应变(global peak circumferential strain, GCS)、整体纵向峰值应变(global peak longitudinal strain, GLS)。左心室整体应变率包括收缩期径向(systolic global radial strain rate, sGRSR)、周向(systolic global circumferential strain rate, sGCSR)和纵向应变率(systolic global longitudinal strain rate, sGLSR), 以及舒张期径向(diastolic global radial strain rate, dGRSR)、周向(diastolic global circumferential strain rate, dGCSR)和纵向应变率(diastolic global longitudinal strain rate, dGLSR)。GRS、GCS

和相应的应变率在短轴位图像上获取, GLS 和相应的应变率在四腔长轴位图像上获取。

在 Mapping 分析模块导入增强前后的 T₁-mapping 和 T₁ρ-mapping 数据, 智能识别加手动校正标记左心室心内膜和心外膜轮廓, 按 16 个心肌节段测量左心室心肌的初始 T₁、T₁ρ 值, 记录整体初始 T₁、T₁ρ 的平均值, 以及每个受试者心肌节段中的 T₁ρ 的最大值。ECV 由增强前、后心肌和血池 T₁ 值以及血细胞比容自动计算得出。另外, 由两名有 CMR 诊断经验的医师逐层查看 LGE 图像, 意见不一致时, 由一名具有 25 年 CMR 诊断经验的医师最终确定。按照是否存在 LGE 将 HCM 患者分为 LGE 阳性和阴性两个亚组。

4. 统计学分析

使用 IBM SPSS 25.0 软件进行统计学分析。Shapiro-Wilk 检验用于检验数据的正态分布。符合正态分布的连续变量数据描述为平均值±标准差, 不符合正态分布者采用中位数(四分位距)表示。分类变量采用例数(百分比)表示。采用独立样本 *t* 检验来评估 HCM 和对照组间符合正态分布的定量数据, 非正态分布数据采用 Mann-Whitney *U* 检验。LGE 阳性组、LGE 阴性组和对照组间符合正态分布定量数据采用单因素方差分析比较, 若有差异则用 LSD 法进一步两两比较, 采用 Bonferroni 法校正; 不符合正态分布则采用 Kruskal-Wallis 检验。计数资料以百分比表示, 采用 χ^2 检验或 Fisher 精确概率法分析。CMR 测量的参数间的相关性用 Pearson 相关分析(正态分布数据)或 Spearman 相关分析(非正态分布数据)进行分析。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

1. HCM 患者与对照组的基线特征和 CMR 定量参数比较

HCM 组与对照组在性别、年龄、体质量指数、体表面积、心率等基线资料方面差异均无统计学意义(P 均 > 0.05 , 表 1)。尽管两组间左心室容积参数及收缩功能指标(LVEDVi、LVESVi、LVSVi、LVEF、LVCI)未见显著差异, 但 HCM 组呈现以下特征性改变: HCM 组的左心室舒张末期最大室壁厚度[(22.0 ± 4.0) mm vs. (8.8 ± 1.7) mm, $P < 0.001$]、LVEDMi [(90.3 ± 29.9) g/m² vs. (40.8 ± 11.0) g/m², $P < 0.001$]及整体 T₁ρ 值[(46.8 ± 2.2) ms vs. (42.8 ± 1.6) ms, $P < 0.001$]均显著高于对照组, 且 HCM 组 LVRI 明显升高(1.3 ± 0.3 vs. 0.6 ± 0.1, $P < 0.001$)。

HCM 组的心肌应变和应变率普遍受损, 其中纵向应变(GLS: -10.1% ± 3.3% vs. -17.2% ±

表 1 HCM 患者与对照组的一般临床资料和 CMR 相关参数比较

参数	HCM 组	对照组	<i>t</i> / χ^2	<i>P</i> 值
男性/例(%)	18(45%)	7(47%)	0.012	0.912
年龄/岁	46.4±16.7	38.7±14.3	1.593	0.117
体质量指数/kg/m ²	24.4±3.6	22.5±3.2	1.893	0.064
体表面积/m ²	1.7±0.2	1.7±0.2	0.498	0.620
心率/次/分	63.3±4.1	66.1±6.0	-1.657	0.114
左心室舒张末期最大室壁厚度/mm	22.0±4.0	8.8±1.7	17.023	<0.001*
LVEDVi /mL/m ²	69.9±12.8	67.2±18.1	0.624	0.535
LVESVi /mL/m ²	31.1±8.0	29.4±10.7	0.644	0.523
LVSVi /mL/m ²	38.8±8.0	37.8±9.0	0.399	0.692
LVEF/%	55.6±7.0	57.0±6.5	-0.650	0.519
LVCI /L/min/m ²	2.3±0.6	2.5±0.5	-1.279	0.206
LVEDMi /g/m ²	90.3±29.9	40.8±11.0	8.990	<0.001*
LVRI/g/mL	1.3±0.3	0.6±0.1	12.390	<0.001*
GRS/%	28.2±7.4	34.5±7.9	-2.748	0.008*
GCS/%	-16.3±2.9	-19.4±2.6	3.575	0.001*
GLS/%	-10.1±3.3	-17.2±1.9	7.858	<0.001*
sGRSR/s ⁻¹	1.3±0.4	1.8±0.6	-3.186	0.005*
sGCSR/s ⁻¹	-0.8±0.2	-1.0±0.2	3.902	<0.001*
sGLSR/s ⁻¹	-0.5±0.2	-0.9±0.2	6.324	<0.001*
dGRSR/s ⁻¹	-0.2±1.5	-1.2±1.6	1.972	0.054
dGCSR/s ⁻¹	0.3±0.6	0.7±0.6	-2.381	0.021*
dGLSR/s ⁻¹	0.4±0.1	0.8±0.5	-3.008	0.009*
整体 T ₁ ρ 值/ms	46.8±2.2	42.8±1.6	6.498	<0.001*
最大 T ₁ ρ 值/ms	51.0±2.8	46.0±1.1	6.589	<0.001*
初始 T ₁ 值/ms	1303.0±39.2	1242.5±26.2	5.517	<0.001*

注：* *P*<0.05

1.9%，*P*<0.001)及收缩期纵向应变率(sGLSR：-0.5±0.2 s⁻¹ vs. -0.9±0.2 s⁻¹，*P*<0.001)差异最为显著，仅舒张期径向应变率(dGRSR)在两组间差异无统计学意义(*P*=0.054)。HCM 患者的 CMR 图像见图 1。

2.LGE 阳性组、LGE 阴性组和对照组间左心室重

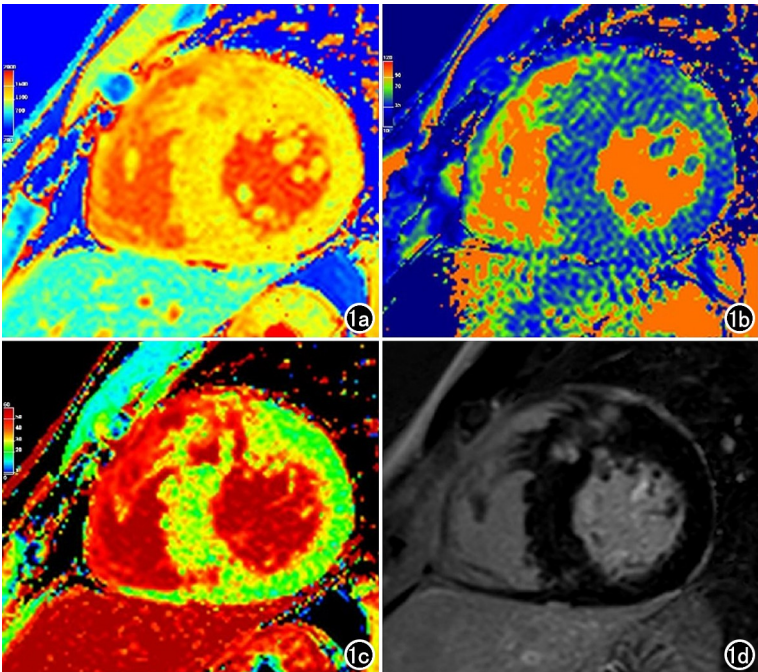


图 1 肥厚型心肌病。a)初始 T₁-mapping 图像;b)T₁ρ-map-ping 图像;c)ECV 图像;d)延迟增强图像。

构指数、应变参数和 T₁ρ、初始 T₁ 值分析

根据 LGE 表现将 HCM 患者分为 LGE 阳性组 (n=31)和 LGE 阴性组 (n=9)，与对照组进行对比分析(表 2)；LGE 阳性组和 LGE 阴性组的整体 T₁ρ 值、最大 T₁ρ 值、LVRI 均显著高于对照组(*P* 均<0.05)。LGE 阳性组的初始 T₁ 值[(1310.6±39.3)ms]较 LGE 阴性组 [(1276.8±26.0) ms] 和对照组 [(1242.5±26.2)ms]升高(*P* 均<0.001)。与对照组相比，LGE 阴性组虽保持 GRS 和 GCS (*P* 均>0.05)，但 GLS 已显著降低 (-12.8%±2.6% vs. -17.2%±1.9%，*P*=0.001)。相对于对照组，LGE 阳性组三个方向应变均受损 (GRS: 26.4%±7.0%，GCS: -15.6%±2.8%，GLS: -9.3%±3.1%，*P* 均<0.05)。LGE 阳性组与阴性组间整体 T₁ρ 值、最大 T₁ρ 值和 LVRI 的差异无统计学意义 (*P* 均>0.05)，但三个方向的应变差异明显(*P* 均<0.05)。

3.心肌 T₁ ρ、初始 T₁ 值与左心室功能应变参数相关性分析

LV 整体 T₁ρ 值与 sGLSR 相关性最强 (*r*=0.600，*P*<0.001)；最大 T₁ρ 值与左心室舒张末期最大室壁厚度相关性最高(*r*=0.597，*P*<0.001)；初始 T₁ 值与 GLS 相关性最强 (*r*=0.644，*P*<0.001)，见表 3。此外，左心室

表 2 LGE 阳性组、LGE 阴性组和对照组间左心室重构指数、应变参数和 T₁ρ、初始 T₁ 值分析

参数	LGE 阳性组	LGE 阴性组	对照组	F	P	两两比较 P 值		
						LGE 阳性 vs. 对照组	LGE 阴性 vs. 对照组	LGE 阳性 vs. 阴性
左心室舒张末期最大室壁厚度/mm	22.8±4.3	19.5±1.4	8.8±1.7	85.134	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *	0.041 *
LVEDMi/g/m ²	90.8±30.4	88.7±29.7	40.8±11.0	19.073	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *	>0.999
LVRI/g/mL	1.3±0.3	1.2±0.2	0.6±0.1	39.682	<0.001 *	<0.001 *	<0.001 *	0.471
GRS/%	26.5±7.0	34.3±5.2	34.5±7.9	8.604	0.001 *	0.002 *	>0.999	0.015 *
GCS/%	-15.6±2.8	-18.8±1.7	-19.4±2.6	12.750	<0.001 *	<0.001 *	>0.999	0.006 *
GLS/%	-9.3±3.1	-12.8±2.6	-17.2±1.9	42.038	<0.001 *	<0.001 *	0.001 *	0.005 *
sGRSR/s ⁻¹	1.2±0.4	1.5±0.3	1.8±0.6	9.168	<0.001 *	<0.001 *	0.404	0.225
sGCSR/s ⁻¹	-0.7±0.2	-0.9±0.1	-1.0±0.2	9.061	<0.001 *	<0.001 *	0.260	0.366
sGLSR/s ⁻¹	-0.5±0.2	-0.6±0.1	-0.9±0.2	23.867	<0.001 *	<0.001 *	0.008 *	0.097
dGRSR/s ⁻¹	-0.1±1.5	-0.6±1.6	-1.2±1.6	2.179	0.123	—	—	—
dGCSR/s ⁻¹	0.2±0.6	0.5±0.5	0.7±0.6	3.848	0.028 *	0.029 *	>0.999	0.512
dGLSR/s ⁻¹	0.4±0.1	0.5±0.1	0.8±0.5	11.820	<0.001 *	<0.001 *	0.066	0.495
整体 T ₁ ρ 值/ms	47.2±2.1	45.6±2.2	42.8±1.6	24.856	<0.001 *	<0.001 *	0.005 *	0.109
最大 T ₁ ρ 值/ms	51.4±2.9	49.6±2.2	46.0±1.1	24.664	<0.001 *	<0.001 *	0.003 *	0.180
初始 T ₁ 值/ms	1310.6±39.3	1276.8±26.0	1242.5±26.2	20.251	<0.001 *	<0.001 *	0.066	0.036 *
ECV/%	26.9±3.2	24.8±2.0	—	t=1.871	0.069	—	—	—

注：* P<0.05

表 3 相关性分析结果

参数	整体 T ₁ ρ 值		最大 T ₁ ρ 值		初始 T ₁ 值	
	相关系数	P 值	相关系数	P 值	相关系数	P 值
左心室舒张末期最大室壁厚度/mm	0.578	<0.001 *	0.597	<0.001 *	0.590	<0.001 *
LVEDMi/g/m ²	0.389	0.003 *	0.369	0.006 *	0.411	0.002 *
LVRI/g/mL	0.477	<0.001 *	0.483	<0.001 *	0.481	<0.001 *
GRS/%	-0.278	0.040 *	-0.261	0.054	-0.359	0.007 *
GCS/%	0.362	0.007 *	0.337	0.012 *	0.441	0.001 *
GLS/%	0.590	<0.001 *	0.587	<0.001 *	0.644	<0.001 *
sGRSR/s ⁻¹	-0.416	0.002 *	-0.428	0.001 *	-0.421	0.001 *
sGCSR/s ⁻¹	0.452	0.001 *	0.435	0.001 *	0.362	0.007 *
sGLSR/s ⁻¹	0.600	<0.001 *	0.594	<0.001 *	0.623	<0.001 *
dGRSR/s ⁻¹	0.093	0.500	0.125	0.364	0.190	0.165
dGCSR/s ⁻¹	-0.251	0.065	-0.296	0.028 *	-0.276	0.041 *
dGLSR/s ⁻¹	-0.474	<0.001 *	-0.420	0.001 *	-0.346	0.010 *

注：* P<0.05

整体 T₁ρ 值与初始 T₁ 值呈正相关($r=0.649, P<0.001$),整体 T₁ρ 值与 ECV 无显著相关性($r=0.298, P=0.062$),最大 T₁ρ 值与初始 T₁ 值和 ECV 呈正相关($r=0.596, P<0.001; r=0.325, P=0.041$)。

讨 论

本研究创新性采用 CMR 中的 T₁ρ-mapping 技术联合心肌应变和 LVRI,系统性评估了 HCM 患者的心肌纤维化及其与心功能和左心室重构的关系,主要发现:①HCM 患者的 T₁ρ 值较健康对照组显著升高,即使在 LGE 阴性患者中,T₁ρ 值仍显著高于对照组;②T₁ρ 值与左心室应变参数有相关性,表明心肌纤维化程度与心肌收缩功能损伤密切相关;③左心室 T₁ρ 值与 LVRI 存在正相关,提示纤维化进展可能促进心室重构。

既往有研究者发现 LGE 阴性的 HCM 患者中心肌 T₁ρ、初始 T₁ 和 ECV 值升高,T₁ρ 和 T₁、ECV 之间存在一定的相关性^[5,6,11]。Wang 等^[12]研究表明 T₁ρ 和 LGE 的纤维化面积均与左心室最大室壁厚度呈正

相关,T₁ρ 与 LGE 测量的纤维化面积间呈正相关。这与本研究结果一致。本研究中 LGE 阴性组的 LVRI 和心肌 T₁ρ、初始 T₁ 值均高于对照组,说明即使无明显 LGE 强化,HCM 也存在异常重构和心肌纤维化,并且心肌纤维化与左心室壁最大厚度、左心室质量和左心室异常重构之间存在相关性。另外,本研究中 T₁ρ 值和初始 T₁ 值、ECV 存在相关性,说明 T₁ρ 与其它评估心肌纤维化的技术如 T₁-mapping、ECV 之间存在联系。但在本研究中 LGE 阳性组和阴性组的 T₁ρ 值差异无统计学意义,由于 HCM 患者存在不同程度的心肌纤维化,本研究中 LGE 阴性组患者仅 9 例,可能会影响统计效能,也有可能 HCM 组织学异常在不同心肌节段中分布不同,而本研究选取的是左心室心肌整体 T₁ρ 值,可能会掩盖节段分布的异常。有研究用两个不同的自旋锁定频率扫描 T₁ρ,计算出心肌纤维化指数(myocardial fibrosis index, mFI)^[13-15],认为 mFI 比绝对 T₁ρ-mapping 在检测心肌纤维化方面更敏感。Wang 等^[15]将该参数应用于 HCM,结果表明 HCM 中肥厚心肌节段和非肥厚节段的 T₁ρ、mFI

均比正常对照组升高,心肌节段的 $T_1\rho$ 、mFI 和 ECV 间存在强相关性,受试者操作特征曲线显示,mFI 鉴别 HCM 正常和肥厚节段纤维化程度的价值与 ECV 相当或显著优于 ECV,因此, $T_1\rho$ 成像的 mFI 能敏感地检测 HCM 甚至 HCM 正常心肌节段的弥漫性心肌纤维化。而本研究受限于紧密的临床工作流程,由于只扫描了一个自旋锁定频率的 $T_1\rho$,无法计算 mFI,未来研究中可以尝试应用该参数评估 HCM 患者的心肌纤维化。

由于左心室几何构型的变化是动态的,会影响质量和体积,Castro 等^[16]提出了评价左心室重构的指标 LVRI 将左心室容积和心肌质量结合在一起,用 3D 超声测量的数据表明肥厚型心肌病患者的左心室质量和 LVRI 均比健康志愿者升高,而 LVEDV、LVESV 和 LVEF 与健康志愿者相比差异无统计学意义。此外,还有研究者对左心室重塑和纤维化在性别方面的差异进行了深入探讨,发现男性和女性在左心室的重塑和纤维化上表现出明显的差异,梗阻型 HCM 女性的重塑程度明显大于男性,这种广泛的重构似乎主要由该患者亚组中相对增加的心肌质量决定^[17]。Chen 等^[18]研究结果也表明左室重构和心肌纤维化存在明显的性别差异,女性 HCM 患者的 LVRI 和 LGE 范围均大于男性,LVRI 和 LGE 程度与舒张功能参数均有显著相关性。本研究尚未对不同性别纤维化和左心室重构的差异进行分析。还有研究者探讨了 HCM 患者左心室重构对 CMR 评估房颤的影响,结果表明合并房颤的 HCM 患者左心房内径、LVRI 和年龄显著大于不合并房颤的 HCM 患者,LVRI 和左心房内径是 HCM 患者发生房颤的独立预测因素,提示左心室重构可能参与了 HCM 患者房颤的发生^[19]。

本研究中 HCM 患者的应变和应变率参数均低于对照组,并且心肌纤维化参数 $T_1\rho$ 值和初始 T_1 值与心肌应变有相关性。既往也有研究表明 HCM 患者的双心室应变和应变率受损^[8,20]。Jin 等^[21]在 259 例非缺血性/缺血性心肌病患者中的研究结果表明当 T_1 或 ECV 在异常范围内时,GLS、GCS 和 GRS 的降低与 ECV 的增加、初始 T_1 的增加和增强后 T_1 的降低有相关性。另外有研究表明在 LVEF 正常且纤维化负担低(LGE 百分比低于 15%)的 HCM 患者左室 GLS、GCS、GRS 均低于正常对照组,左室心肌质量指数升高,并且即使在左室心肌质量指数正常的情况下,左心室应变也受损^[22]。Bogarapu 等^[23]研究发现与 LGE 阴性患者相比,LGE 阳性的儿童 HCM 患者整体纵向、周向和径向应变和应变率均减低。局部分析显示,与无纤维化的游离壁相比,有纤维化的间隔壁的应变和应变率较低。本研究中 LGE 阳性组患者的各项

应变参数均较 LGE 阴性组减低,但应变率参数差异无统计学意义。

HCM 患者由于心肌肥大、室壁增厚,心腔相对性缩小,左心室射血分数通常未减低,而心肌应变的减低可以反应出心肌形变运动和功能受损,即使是 LGE 无明显强化的患者,其左心室重构异常、应变减低,有心肌纤维化,因此在临床工作中结合初始 T_1 值、 $T_1\rho$ 技术和心肌应变、左心室重构指数可以更全面评估 HCM 的组织特征和心肌运动、功能,为临床准确诊断和进一步治疗提供帮助。此外,对于临床上一些受限于肾功能不全、对比剂过敏等因素的患者,可以选择用无对比剂增强的 T_1 -mapping、 $T_1\rho$ -mapping 技术评估心肌纤维化。

本研究存在以下局限性:①样本量小,本研究只纳入了 40 例 HCM 患者,由于纳入的病例数比较少,尚未对不同 HCM 分型的患者做亚组分析,未来需要纳入更大的样本量以进一步分为亚组进行分析研究;此外,由于 HCM 患者会出现不同程度的心肌纤维化,本研究中 LGE 阴性组患者仅 9 例,可能会影响统计效能,后续需扩大样本、进行多中心验证。② $T_1\rho$ 参数受扫描条件、频率设定等影响较大,本研究中仅使用单一自旋锁定频率(300 Hz)进行扫描,未能获取 mFI 等更具敏感性的指标,未来可考虑多频率扩展。③本研究中只评估了左心室整体心肌应变参数,未按具体的心肌节段进行局部心肌应变的评价,后续研究中将纳入心肌节段水平的评估。④本研究为横断面设计,虽揭示 $T_1\rho$ 与功能结构指标的关联,但尚不能直接反映其预后,未来的研究中将结合随访数据探讨其预测主要不良心血管事件等结局的能力。

综上所述,本研究证明了 $T_1\rho$ -mapping 技术可有效评估 HCM 患者心肌纤维化,其参数变化与心肌力学障碍及心室重构显著相关。通过整合 $T_1\rho$ 、应变及 LVRI 等多模态参数,可为 HCM 的早期诊断、危险分层及个体化治疗提供重要依据。未来研究应着重探索该技术在预后预测及治疗监测中的应用价值。

参考文献:

- [1] Gersh BJ, Maron BJ, Bonow RO, et al. 2011 ACCF/AHA guideline for the diagnosis and treatment of hypertrophic cardiomyopathy: executive summary; A report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines[J]. Circulation, 2011, 124(24): 2761-2796.
- [2] Marian AJ, Braunwald E. Hypertrophic cardiomyopathy: Genetics, pathogenesis, clinical manifestations, diagnosis, and therapy[J]. Circ Res, 2017, 121(7): 749-770.
- [3] Lee HJ, Kim J, Chang SA, et al. Major clinical issues in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Korean Circ J, 2022, 52(8): 563-575.
- [4] Raiker N, Vullaganti S, Collins JD, et al. Myocardial tissue charac-

- terization by gadolinium-enhanced cardiac magnetic resonance imaging for risk stratification of adverse events in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(6): 1147-1156.
- [5] Thompson EW, Kamesh Iyer S, Solomon MP, et al. Endogenous T1rho cardiovascular magnetic resonance in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2021, 23(1): 120.
- [6] Dong Z, Yin G, Yang K, et al. Endogenous assessment of late gadolinium enhancement grey zone in patients with non-ischaemic cardiomyopathy with T1rho and native T1 mapping[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2023, 24(4): 492-502.
- [7] 王可颜, 郑捷, 张勇, 等. 磁共振内源性对比 T1 ρ 技术在肥厚型心肌病心肌纤维化检测中的应用价值[J]. *磁共振成像*, 2022, 13(12): 51-57.
- [8] Yang L, Zhang L, Cao S, et al. Advanced myocardial characterization in hypertrophic cardiomyopathy: feasibility of CMR-based feature tracking strain analysis in a case-control study[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(11): 6118-6128.
- [9] 文苗, 杨智, 蒋小凤, 等. 基于心脏磁共振组织追踪技术评估合并 T2 高信号的肥厚型心肌病患者左心室心肌损伤[J]. *放射学实践*, 2024, 39(3): 358-363.
- [10] 胡翀, 束晶苇, 赵韧, 等. 心脏 MR 初始 T1 值及组织追踪技术在心肌淀粉样变和肥厚型心肌病的初步应用价值[J]. *放射学实践*, 2021, 36(3): 282-287.
- [11] 尹刚, 董志翔, 杨新令, 等. 心脏 MR T1 ρ 定量技术在肥厚型心肌病心肌纤维化评估中的初步应用[J]. *中华放射学杂志*, 2023, 57(10): 1087-1093.
- [12] Wang C, Zheng J, Sun J, et al. Endogenous contrast T1rho cardiac magnetic resonance for myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy patients[J]. *J Cardiol*, 2015, 66(6): 520-526.
- [13] Deng W, Wang Z, Jia Z, et al. Cardiac T1rho mapping values affected by age and sex in a healthy chinese cohort[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2024, 60(4): 1617-1625.
- [14] Deng W, Xue Y, Li Y, et al. Normal values of magnetic resonance T1 ρ relaxation times in the adult heart at 1.5T MRI[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2022, 58(2): 477-485.
- [15] Wang K, Zhang W, Li S, et al. Noncontrast T1rho dispersion imaging is sensitive to diffuse fibrosis: A cardiovascular magnetic resonance study at 3T in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Magn Reson Imaging*, 2022, 91: 1-8.
- [16] De Castro S, Caselli S, Maron M, et al. Left ventricular remodeling index (LVRI) in various pathophysiological conditions: a real-time three-dimensional echocardiographic study[J]. *Heart*, 2007, 93(2): 205-209.
- [17] Schulz-Menger J, Abdel-Aty H, Rudolph A, et al. Gender-specific differences in left ventricular remodelling and fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy: Insights from cardiovascular magnetic resonance[J]. *Eur J Heart Fail*, 2008, 10(9): 850-854.
- [18] Chen YZ, Qiao SB, Hu FH, et al. Left ventricular remodeling and fibrosis: sex differences and relationship with diastolic function in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Eur J Radiol*, 2015, 84(8): 1487-1492.
- [19] Tian H, Cui J, Yang C, et al. Left ventricular remodeling in hypertrophic cardiomyopathy patients with atrial fibrillation[J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2018, 18(1): 207.
- [20] Palmisano V, Cossa S, Esposito A, et al. Obstructive and nonobstructive hypertrophic cardiomyopathy: differences in global and segmental myocardial strain by cardiac magnetic resonance feature tracking[J]. *J Thorac Imaging*, 2022, 37(1): 49-57.
- [21] Jin C, Weber J, Singh H, Gliganic K, et al. The association of reduced left ventricular strains with increased extracellular volume and their collective impact on clinical outcomes[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2021, 23(1): 93.
- [22] Salmanipour A, Ghaffari Jolfayi A, Sabet Khadem N, et al. The predictive value of cardiac MRI strain parameters in hypertrophic cardiomyopathy patients with preserved left ventricular ejection fraction and a low fibrosis burden: a retrospective cohort study[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2023, 10: 1246759.
- [23] Bogarapu S, Puchalski MD, Everitt MD, et al. Novel cardiac magnetic resonance feature tracking (CMR-FT) analysis for detection of myocardial fibrosis in pediatric hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Pediatr Cardiol*, 2016, 37(4): 663-673.

(收稿日期: 2025-04-13 修回日期: 2025-06-29)

· 心血管影像学专题 ·

导管消融对非梗阻性肥厚型心肌病合并持续性房颤患者左房重构的作用

杨盼,唐亚捷,肖明虎,姚焰,丁立刚,朱振辉

【摘要】 目的:评估非梗阻性肥厚型心肌病(NOHCM)合并持续性房颤(perAF)患者在接受导管消融后左心房结构和功能的重构,并探究超声心动图参数对术后房颤复发的预测价值。**方法:**连续性纳入 2023 年 1 月—2024 年 12 月在中国医学科学院阜外医院确诊的有完整临床资料和完整、清晰超声心动图影像资料的 20 例 NOHCM 合并 perAF 并接受导管消融的患者,根据随访期间是否复发分为合并复发组($n=11$)和无复发组($n=9$)。使用单拍实时全容积三维超声心动图测量左心房容积和左心房射血分数,采用二维斑点追踪技术测量左心房应变,并测量其他常规参数。比较术前及术后左心房结构及功能的差异,并采用 Cox 回归分析该类患者房颤复发的风险因子。**结果:**平均随访时间为 10.4 ± 6.4 月,随访期间 11 例(55%)复发房颤/房扑。对于全组患者,术后 3 月左心房前后径(LAD) [$(47.20 \pm 3.64) \text{ mm}$ vs. $(49.55 \pm 3.80) \text{ mm}$, $P < 0.05$]、双平面左心房容积指数(LAVi) [$(54.84 \pm 13.01) \text{ mL/m}^2$ vs. $(61.33 \pm 14.38) \text{ mL/m}^2$, $P < 0.05$]、三维 LAVi [$(60.63 \pm 12.90) \text{ mL/m}^2$ vs. $(70.32 \pm 14.20) \text{ mL/m}^2$, $P < 0.05$] 均较术前减小,左心房射血分数(LAEF)较术前增加($25.15\% \pm 8.49\%$ vs. $18.50\% \pm 5.42\%$, $P < 0.05$),无复发组患者的左心房减小的程度及左心房射血分数增加程度较复发组大,后续随访期间呈相同趋势。全组患者术前均丧失左心房收缩应变,术后获得一定程度恢复。全组患者术后 3 个月左心房存储应变(LASr) ($10.17\% \pm 3.79\%$ vs. $6.01\% \pm 2.80\%$, $P < 0.05$) 较术前增加,复发组的术前及术后 LASr 均较无复发组低,后续随访期间呈相同趋势。多因素 Cox 回归分析显示,术前 LASr [HR:0.629 (0.406~0.972), $P=0.037$] 及三维 LAVi [HR:1.061 (1.018~1.202), $P=0.047$] 为房颤复发的独立预测因子。**结论:**NOHCM 合并 perAF 患者接受导管消融术后左心房结构和功能显著改善。术前 LASr 及三维 LAVi 有可能可以成为预测该类患者导管消融后复发的潜在影像指标。

【关键词】 非梗阻性肥厚型心肌病;持续性房颤;导管消融;左心房

【中图分类号】 R445.2;R542.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2025)11-1363-08

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2025.11.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The role of catheter ablation in left atrial remodeling in patients with non-obstructive hypertrophic cardiomyopathy complicated by persistent atrial fibrillation YANG Pan, TANG Ya-jie, XIAO Ming-hu, et al. Ultrasound Department, Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100037, China

【Abstract】 Objective: To evaluate left atrial (LA) structural and functional remodeling after catheter ablation in patients with non-obstructive hypertrophic cardiomyopathy (NOHCM) complicated by persistent atrial fibrillation (perAF), and to explore the predictive value of echocardiographic parameters for post-ablation AF recurrence. **Methods:** A total of 20 consecutive patients with NOHCM complicated by perAF who underwent catheter ablation at Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences from January 2023 to December 2024 with complete clinical data and high-quality echocardiographic imaging data were enrolled. Based on whether AF recurred during follow-up, patients were divided into the recurrence group ($n=11$) and non-recurrence group ($n=9$). Single-beat real-time full-volume three-dimensional (3D) echocardiography was used to measure LA volume and LA ejection

作者单位: 100037 北京,中国医学科学院阜外医院超声科(杨盼、肖明虎、朱振辉),心外科(唐亚捷),心律失常中心(姚焰、丁立刚)

作者简介: 杨盼(1990—),女,贵州人,博士,主治医师,主要从事心血管超声影像学研究。

通讯作者: 朱振辉, E-mail: dr.zhu@139.com

基金项目: 中国医学科学院阜外医院特色学科发展项目基金(2022-FWTS09)

fraction (LAEF). Two-dimensional speckle-tracking technology was applied to assess LA strain, and other conventional parameters were also measured. Differences in LA structure and function before and after ablation were compared, and Cox regression analysis was performed to identify risk factors for AF recurrence. **Results:** The mean follow-up duration was 10.4 ± 6.4 months, during which 11 patients (55%) experienced recurrence of AF/atrial flutter. At 3 months post-ablation, the entire cohort showed significant reductions in LA diameter (LAD) [(47.20 ± 3.64) mm vs. (49.55 ± 3.80) mm, $P < 0.05$], biplane LA volume index (LAVi) [(54.84 ± 13.01) mL/m² vs. (61.33 ± 14.38) mL/m², $P < 0.05$], and 3D LAVi [(60.63 ± 12.90) mL/m² vs. (70.32 ± 14.20) mL/m², $P < 0.05$], along with increased LAEF ($25.15\% \pm 8.49\%$ vs. $18.50\% \pm 5.42\%$, $P < 0.05$). The magnitude of left atrial size reduction and LAEF improvement was greater in the non-recurrence group than in the recurrence group, with the same trend maintained during subsequent follow-up. Preoperatively, all patients had lost LA contractile strain, which partially recovered post-ablation. LA reservoir strain (LASr) significantly improved at 3 months ($10.17\% \pm 3.79\%$ vs. $6.01\% \pm 2.80\%$, $P < 0.05$). Both preoperative and postoperative LASr were lower in the recurrence group than in the non-recurrence group, with the consistent trend observed during further follow-up. Multivariate Cox regression analysis revealed that preoperative LASr [HR: 0.629 (0.406~0.972), $P = 0.037$] and 3D LAVi [HR: 1.061 (1.018~1.202), $P = 0.047$] were independent predictors of AF recurrence. **Conclusion:** In patients with NOHCM complicated by perAF, LA structure and function improve significantly after catheter ablation. Preoperative LASr and 3D LAVi may serve as potential imaging indicators for predicting recurrence after catheter ablation in this patient population.

【Key words】 Non-obstructive hypertrophic cardiomyopathy; Persistent atrial fibrillation; Catheter ablation; Left atrium

肥厚型心肌病 (hypertrophic cardiomyopathy, HCM) 是最常见的遗传性心血管疾病, 以原发性心室壁肥厚及心肌间质纤维化为特点, 心室内腔变小, 舒张功能下降^[1]。舒张功能下降、心房压升高及心房心肌纤维化会引发心房结构及电重构, 其心房颤动 (atrial fibrillation, AF) 发生率显著升高, 约为正常人群的 4~6 倍^[2]。同时, 因心房功能下降, 合并 AF 的 HCM 患者死亡风险及血栓栓塞事件发生率分别是普通 AF 患者的 4 倍及 8 倍, 心衰的发生率高达 65%^[3,4]。目前指南已推荐对这类人群进行积极的节律控制治疗, 而导管消融是房颤的一线节律控制策略, 2020 年 ESC 房颤管理指南^[5]更是将导管消融治疗持续性房颤升级为 I 类推荐。HCM 患者左房壁更厚、心房纤维化更严重, 当合并 AF 时, 采用导管消融行节律控制的难度更大, 复发率较普通 AF 患者更高^[7]。导管消融可显著改善患者的全因死亡率、心力衰竭症状及生存质量, 但目前的研究结果显示, 导管消融对 HCM 合并 AF 的单次手术治疗后的成功率低于普通房颤人群, 仅为 32.9%~68.3%^[8,9]。而对于 HCM 合并 AF 患者导管消融后的复发预测因素及节律控制后左房的重构研究较少, 仅有的少数研究将该类患者的左心房纳入分析, 但仅包含左心房前后径 (left atrial diameter, LAD)^[10]。目前缺乏对导管消融相关非梗阻性肥厚型

心肌病-持续性房颤 (hypertrophic cardiomyopathy and persistent atrial fibrillation, NOHCM-perAF) 患者左心房重构的系统性研究。因此, 本研究基于超声系统化评估, 探究导管消融对 NOHCM-perAF 患者的左心房重构作用, 并寻找该类患者复发的相关因素。

材料与方法

1. 研究对象

前瞻性连续纳入 2023 年 1 月—2025 年 1 月在中国医学科学院阜外医院就诊的 NOHCM-perAF 并接受内科导管消融治疗的 26 例患者, 排除其中 6 例患者 (经 MRI 确诊为高血压心肌肥厚 1 例, 声窗欠佳 1 例, 合并中量以上二尖瓣返流 2 例, 未行左房消融 1 例, 非梗阻性心肌病失代偿期 2 例), 最终 20 例患者纳入研究。本研究已获得中国医学科学院阜外医院伦理委员会批准 (批号: 2023-2178)。

2. 临床资料收集

收集患者的一般临床资料, 包括性别、年龄、身高、体重、改良欧洲心律学会 (modified European Heart Rhythm Association, MEHRA) 评分、合并症、药物使用情况、家族史、CHA2DS₂-VASc 评分等。患者术后 3、6、12 个月分别通过 24 小时动态心电图评估房颤复发 (3 个月后停用 I / III 类抗心律失常药物后心电图记

录下捕捉到房扑/房颤)。

3. 超声心动图评估

收集术前及术后 3、6、12 个月的超声心动图数据。采用 Philips EPIQ CVx 仪器,采用 S5-1 及 X5-1 经胸探头,频率为 1~5 MHz。将患者置于左侧卧位。调整灰阶图像的增益、深度和焦点以获取完整清晰的图像。常规采集胸骨旁长轴切面、胸骨旁短轴切面和心尖切面。术前 3 日留取超声心动图资料,房颤状态下参数取 5 个心动周期平均值。

常规二维超声心动图测量:在胸骨旁长轴切面,于心室舒张末期测量右心室舒张末径、室间隔厚度、左心室舒张末径、左心室后壁厚度,于心室收缩末期测量 LAD 及左心室收缩末径。根据 2016 年美国超声心动图学会左室舒张功能评估指南,综合二尖瓣前向血流频谱、组织多普勒、三尖瓣反流速度、左心房大小等对患者的左心室舒张功能进行评估,将舒张功能障碍分为 I 级、II 级和 III 级^[11]。

左心房大小测量:①LAD:在胸骨旁长轴切面,于心室收缩末期测量 LAD。②双平面左房容积指数(left atrial volume index, LAVi):使用双平面 Simpson 法测量左心房容积。根据患者体表面积进行标化获得双平面 LAVi。③三维 LAVi:采用单拍实时全容积三维超声心动 HeartModel 自动测量技术对左心房容积及射血分数进行测量^[12]。使用 X5-1 探头获取心尖四腔心切面,左心在容积轴中心,点击 X-plane,在双平面上确认左心成像清晰,然后点击屏幕上的 HM 按钮收集 Heartmodel 图像。Heartmodel 检测左心内膜表面,利用自适应分析算法,基于初始采集的全局形状和方向识别实现特异性适应。如果操作者对自动识别的轮廓不满意,则可进行局部或全局手动调整,最终获得三维左心房容积,根据患者体表面积进行标化获得三维 LAVi。

左心房应变测量:采用二维斑点追踪成像技术测量左心房应变^[13]。在心尖四腔心切面和心尖二腔心切面基础上,采集动态二维图像,需要在一个完整的心动周期内,包含完整左心房游离壁、房间隔和房顶。调整探头方向、扫查深度和增益等参数,避免左心房显示不完整。在心尖四腔心切面基础上,从二尖瓣瓣环房间隔侧开始描记,2D-STE 显示的心肌节段依次为房间隔、房顶(跨过肺静脉开口)、侧壁至二尖瓣瓣环侧壁侧。在心尖二腔心切面,从二尖瓣瓣环下壁侧开始描记,2D-STE 显示的心肌节段依次为左心房下壁、房顶、前壁至二尖瓣瓣环前壁侧,点击应变分析后获得左心房储存期应变(left atrial reservoir strain, LASr)、左心房管道期应变(left atrial conduit strain, LAScd)和左心房收缩期应变(left atrial contractile

strain, LASct)。

4. 消融方法

所有患者均在局麻下行射频导管消融,心内膜消融线路为双侧肺静脉隔离/左房顶部线/游离壁峡部线/间隔侧峡部线/三尖瓣峡部线,若患者存在前壁低电压区,酌情为患者行左房前壁线消融。术后 3 个月内口服胺碘酮及新型口服抗凝药物,术后 3 个月停用胺碘酮,但继续口服抗凝药。

5. 统计学方法

本研究采用 SPSS 23.0 和 STATA 18 软件进行统计分析,图表绘制使用 R 语言(版本 4.3.2)完成。对于正态分布的连续变量,以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示。复发及无复发组两组之间连续型参数的比较,若符合正态分布则用独立样本 *t* 检验,若不满足正态分布则采用 Mann-Whitney *U* 检验(秩和检验)。分类变量以频数(百分比)表示,当理论频数<5 时组间比较使用 Fisher 确切概率法。采用 Kaplan-Meier 法绘制术后无房颤房扑复发率的生存曲线。为分析房颤复发的影响因素,构建 Cox 比例风险回归模型,分别进行单因素与多因素分析,多因素 Cox 模型中纳入单因素分析中 $P < 0.05$ 的变量,报告风险比(hazard ratio, HR)及其 95% 置信区间(confidence interval, CI)。所有检验均为双侧检验,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

1. 患者的一般基线资料

该组共 11 例(55%)患者复发,其中 3 例复发阵发性房颤,7 例为房扑,1 例为持续性房颤。除阵发性房颤患者外,其余 8 例复发患者均进行再次导管消融。根据是否复发将患者分为无复发组($n=9$)与复发组($n=11$)。无复发组与复发组的年龄、女性、高血压、糖尿病、血管病变、卒中史及术前 MEHRA 评分症状分级的比例以及药物使用情况、CHA₂DS₂-VASc 评分及房颤持续时间、左心室整体纵向应变(left ventricular global longitudinal strain, LV-GLS)、左心室舒张功能差异均无统计学意义(表 1)。

2. 消融后心律随访结果

所有患者均未失访,平均随访时间为 10.4 ± 6.4 月,期间共 11 例(55%)复发(图 1),其中 8 例在复发后接受了再次导管消融,并在维持窦律的状态下继续完成了超声心动图检查。

3. 导管消融可改善患者的左心房结构和功能

全组患者术前的 LAD、双平面 LAVi、三维 LAVi 分别为 (49.55 ± 3.80) mm、 (61.33 ± 14.38) mL/m²、 (70.32 ± 14.20) mL/m²。复发组术前的左心房大小

表 1 患者的一般基线资料

基线资料	无复发(n=9)	复发(n=11)	统计量	P
年龄	60.00 (56.00,62.00)	60.00 (56.00,60.50)	$Z=-0.15$	0.878
MEHRA 评分(%)			—	0.449
2a	1 (11.11)	0 (0.00)		
2b	4 (44.44)	3 (27.27)		
3	4 (44.44)	6 (54.55)		
4	0 (0.00)	2 (18.18)		
房颤持续时间/月	5.00 (3.00,6.00)	4.00 (2.00,6.50)	$Z=-0.04$	0.969
女性/例(%)	2 (22.22)	3 (27.27)	—	1.000
合并疾病/例(%)				
高血压	5 (55.56)	4 (36.36)	—	0.653
糖尿病	0 (0.00)	4 (36.36)	—	0.094
卒中史	3 (33.33)	3 (27.27)	—	0.628
冠心病	1 (11.11)	5 (45.45)	—	0.157
CHA2DS2-VASc 评分	2.00 (2.00,3.00)	4.00 (2.00,2.50)	$Z=-0.21$	0.835
LV-GLS/%	-8.48 ± 4.09	-7.37 ± 2.66	$t=-0.73$	0.475
E/e'	18.00 (14.00,20.00)	16.00 (14.50,16.00)	$Z=-0.54$	0.592
舒张功能分级(Ⅱ/Ⅲ)/例(%)	9(100)	11(100)	—	1.000

注:MEHRA 评分为改良欧洲心律学会评分,LV-GLS 为左心室整体纵向应变。

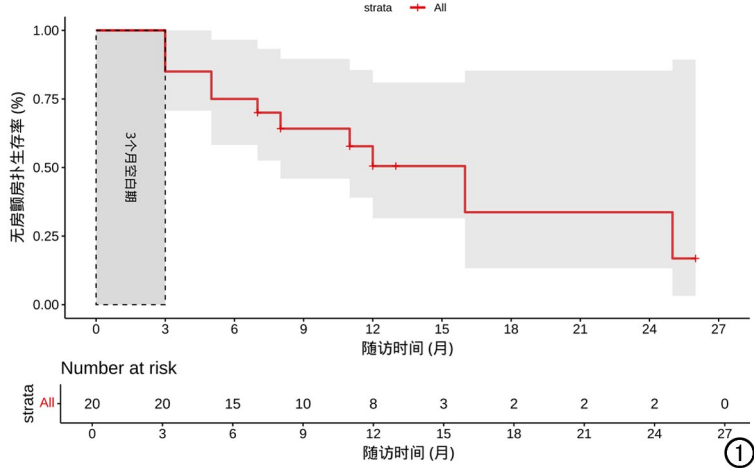


图 1 消融后随访成功率的生存曲线。

数值较无复发组大,但差异无统计学意义。术后 3 个月,全组患者的 LAD、双平面 LAVi、三维 LAVi 分别为 (47.20 ± 3.64) mm、 (54.84 ± 13.01) mL/m²、 (60.63 ± 12.90) mL/m²,均较术前明显减小(P 均 <0.001)。术后 6 个月及 12 个月的左心房仍较术前减小(P 均 <0.001 ,表 2,图 2)。

全组患者术前的 LASct 均丧失。术后 3 个月,全组患者的 LASct 较术前有所恢复,为 $-3.68\%\pm 2.73\%$,复发组与无复发组间无显著差异。术后 6 个月及 12 个月,无复发组的收缩应变基本与术后 3 个月维持相同水平。全组

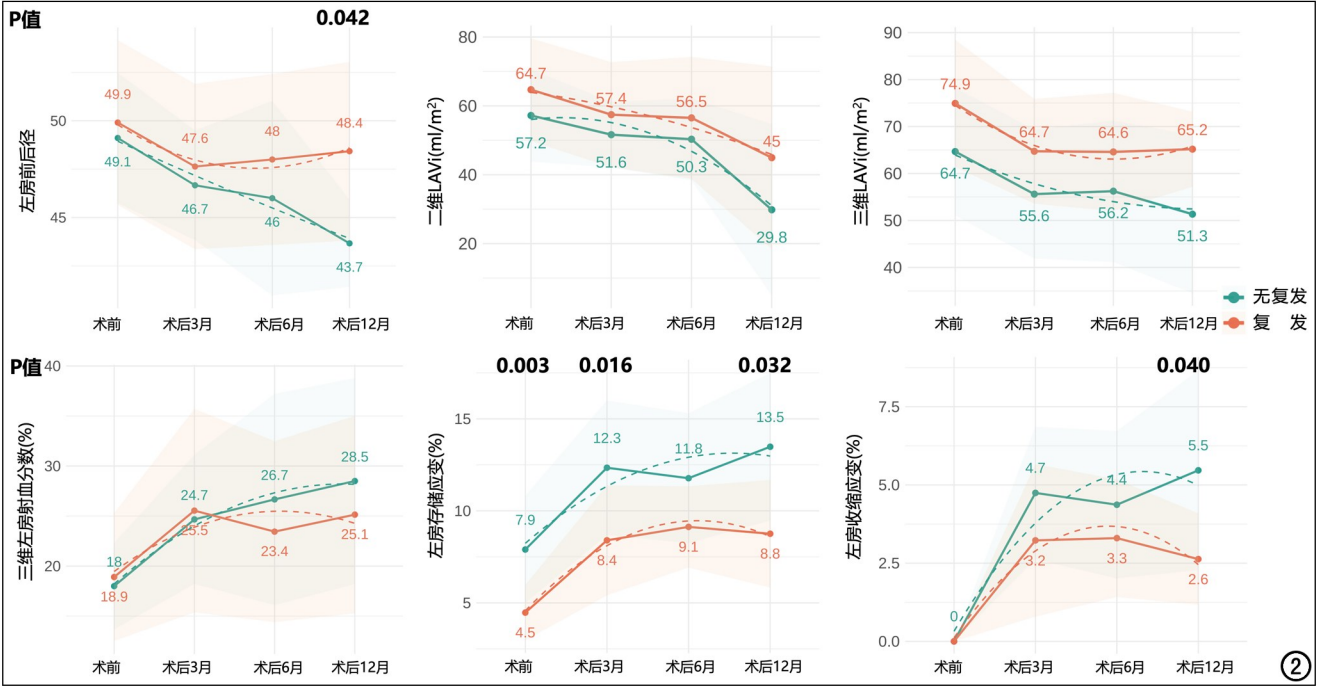


图 2 左心房结构及功能变化趋势。 P 值代表相应时间节点无复发和有复发组相应参数对比的结果,其余未显示 P 值的位置表明无统计学差异。LAD 为左心房前后径,LAVi 为左心房容积指数。

表 2 左心房结构和功能变化情况

变量	无复发(n=9)	有复发(n=11)	统计量	P
左心房大小				
LAD/mm				
术前	49.11±3.37	49.91±4.25	$t=-0.46$	0.653
术后 3 个月	46.67±2.83 *	47.64±4.27 *	$t=-0.58$	0.567
术后 6 个月	46.00±5.02 *	48.00±4.42 *	$t=-0.90$	0.383
术后 12 个月	43.67±2.25 *	48.43±4.61	$t=-2.29$	0.042
二维 LAVi/mL/m ²				
术前	57.21±13.37	64.70±14.90	$t=-1.17$	0.257
术后 3 个月	51.64±9.50 *	57.45±15.25 *	$t=-0.99$	0.334
术后 6 个月	50.32±11.94 *	56.52±17.70 *	$t=-0.87$	0.397
术后 12 个月	29.84±24.84 *	44.97±26.50 *	$t=-1.25$	0.230
三维 LAVi/mL/m ²				
术前	64.68±13.60	74.93±13.53	$t=-1.68$	0.110
术后 3 个月	55.61±13.71 *	64.73±11.15 *	$t=-1.64$	0.118
术后 6 个月	56.24±15.07 *	64.59±12.59 *	$t=-1.28$	0.220
术后 12 个月	51.34±16.83 *	65.19±7.98 *	$t=-1.95$	0.078
左心房功能				
LAEF/%				
术前	18.00±4.30	18.91±6.38	$t=-0.36$	0.720
术后 3 个月	24.67±6.44 *	25.55±10.16 *	$t=-0.22$	0.825
术后 6 个月	26.67±10.55 *	23.44±9.04 *	$t=0.70$	0.497
术后 12 个月	28.50±10.29 *	25.14±9.86 *	$t=0.60$	0.561
LASr/%				
术前	7.90±2.91	4.47±1.51	$t=3.40$	0.003
术后 3 个月	12.34±3.66 *	8.40±2.99 *	$t=2.66$	0.016
术后 6 个月	11.78±3.53 *	9.13±2.21 *	$t=1.95$	0.069
术后 12 个月	13.48±4.00 *	8.76±2.92 *	$t=2.46$	0.032
LASct/%				
术前	0	0	—	1.000
术后 3 个月	-4.74±2.12 *	-2.81±2.95 *	$t=-1.65$	0.117
术后 6 个月	-4.37±2.35 *	-1.72±3.51 *	$t=-1.90$	0.074
术后 12 个月	-5.47±3.19 *	-1.74±2.58 *	$t=-2.33$	0.040

注：* 代表与术前相比 $P<0.05$ 。LAD 为左心房前后径，LAVi 为左心房容积指数，LAEF 为左心房射血分数，LASr 为左心房储存期应变，LASct 为左心房收缩期应变。

患者术前的 LASr 为 $6.01\% \pm 2.80\%$ 。复发组的 LASr 较无复发组低 ($4.47\% \pm 1.51\%$ vs. $7.90\% \pm 2.91\%$, $P=0.003$)。术后 3 个月,全组患者的 LASr 较术前升高 ($P<0.05$),但复发组的 LASr 较无复发组低 ($P=0.016$),术后 12 个月呈相同趋势。全组患者术前的左心房射血分数(left atrial ejection fraction, LAEF)为 $18.50\% \pm 5.42\%$,复发组与无复发组间无显著差异。术后 3 个月,全组患者的左心房射血分数较术前改善 ($P<0.05$),复发组与无复发组间无显著差异,术后 12 个月呈相同趋势(表 2,图 2)。

4.超声指标对导管消融后房颤复发预测的多因素 Cox 回归分析

对该组患者导管消融后房颤复发进行多因素 Cox 回归分析,纳入单因素分析中 P 值 <0.05 (表 3)的变量进行调整,结果显示,术前 LASr 为房颤复发的独立保护因素 ($HR=0.629$, $95\%CI:0.406 \sim 0.972$, $P=0.037$),而三维 LAVi 为独立危险因素 ($HR=1.061$, $95\%CI:1.018 \sim 1.202$, $P=0.047$)。

表 3 超声指标对房颤复发预测的单因素分析

变量	单因素	
	HR (95%CI)	P
性别(女)	1.624 (0.405~6.506)	0.493
高血压	0.617 (0.179~2.120)	0.443
糖尿病	1.830 (0.518~6.458)	0.348
卒中史	0.565 (0.144~2.210)	0.412
血管狭窄	2.605 (0.750~9.048)	0.132
年龄	0.991 (0.906~1.085)	0.848
房颤持续时间	0.955 (0.854~1.069)	0.425
术前 LAEF	0.914 (0.785~1.065)	0.251
E/e'	1.032 (0.907~1.174)	0.633
LV-GLS	0.983 (0.813~1.187)	0.856
术前 LAD	1.137 (0.956~1.353)	0.147
三维 LAVi	1.064 (1.007~1.124)	0.026
术前 LASr	0.561 (0.338~0.933)	0.026

注：LAEF 为左心房射血分数，LV-GLS 为左心室总体纵向应变，LAD 为左心房前后径，LAVi 为左心房容积指数，LASr 为左心房储存期应变。

讨 论

NOHCM 约占 HCM 人群的 30%，不同于肥厚型梗阻性心脏病(hypertrophic obstructive cardiomyopathy, HOCM),外科手术疏通左室流出道并同期行标

准迷宫Ⅳ手术依然可为 HOCM 患者带来接近 90% 的成功率^[14],但 NOHCM 患者一旦合并房颤,极少有机会接受迷宫Ⅳ手术。根据现行指南,NOHCM-perAF 患者仍首选导管消融作为节律控制治疗^[5]。鉴于导管消融对 HCM 合并房颤患者消融成功率更低,所以,这类固有舒张功能不全的房颤患者导管消融后的复发预测因素及复律后左房的重构就显得尤为重要。本研究首次针对 NOHCM-perAF 患者导管消融前后进行详细的经胸超声心动图检查,发现导管消融术后无复发患者左心房结构和功能改善明显,而术前 LASr 及三维 LAVi 为该患者房颤复发的独立预测因子。

首先,HCM 患者舒张功能不全会增加左房压力,从而进一步促进左房结构重构,这解释了 HCM 患者房颤发生率高于普通人群^[4]。房颤的出现会进一步加重左房重构, Lee 等^[15]研究发现,相比于普通房颤患者,合并 AFHCM 的患者术前 LAD 和左房压力均显著更高,且导管消融 1 年后,LAD 缩小程度更低。而本研究发现,无论是否复发,术后 LAD 均显著缩小,而且无复发患者 LAD 缩小的程度更明显。与目前最大的 HCM 合并房颤的导管消融队列(Creta 等^[10])相比,本研究患者术前左房重构更明显[LAD 更大(49 mm vs. 47 mm),术前 LAVi 高达 61.3 mL/m²],但首次消融术后 10 个月的成功率为 45%,高于上述研究再次导管消融后的 1 年成功率(41%)。这说明即便是对于高度左房重构的 NOHCM-perAF 患者,导管消融依然能为患者带来较好的节律控制效果。与 Creta 等^[10]的研究相比,该研究虽然样本量少,但得出了术后左房结构重构的变化趋势,即:无复发组的患者 LAD 与三维 LAVi 的下降趋势比复发组的患者更为明显,这一趋势在术后 1 年时最为明显,且术后 1 年两组间 LAD 差异有统计学意义。上述结果说明,即便对于固有舒张功能不全的 HCM 患者,节律控制无复发的患者的左房会在 1 年内持续逆重构,而复发房扑/房颤的患者,左房逆重构趋势不明显。多因素回归模型发现术前三维 LAVi 是消融后复发的独立预测因素,并能在 LAD 之外提供额外的预测信息,这一结果提示,相比于 LAD,三维 LAVi 更真实地反应左房的形态与实际大小,将其应用在 NOHCM-perAF 患者中或许能辅助心律失常专科医生更精准地筛选出能从导管消融中获益的患者。而该研究应用的单拍实时全容积三维超声心动 HeartModel 自动测量技术可实现快速、准确、重复性高的左心房容积评估^[12],方便超声专科医生对患者的左房结构重构进行评估。

另外,因为“心房心肌病”概念的提出,越来越多的研究关注到左房功能性参数对房颤及卒中的良好预测效果^[16]。目前最常用的左房功能性参数为左房应变。

左心房作为连接左心室和肺静脉的腔室,具有储备功能、管道功能及辅泵功能。储备功能为左心室收缩期时左心房充盈的能力,早期由心房肌松弛引起,晚期由心室肌收缩牵拉左心房壁引起,由 LASr 评价,约占正常人左心房功能的 40%;辅泵功能为左心室舒张晚期心房肌主动收缩的能力,由 LASct 评价,约占 25%^[17]。本研究首次发现,NOHCM-perAF 导管消融患者术前 LASr 是房颤复发的强保护因子。既往针对普通房颤患者的一项研究发现^[18],左心房存储应变是导管消融后复发的预测因子,但该研究中预测房颤复发的 LASr 截断值(24.3%)高,这可能与普通房颤患者的心房纤维化程度较 HCM 患者轻且该研究纳入了一部分阵发性房颤患者相关。另一项关于 perAF 患者的研究发现^[19],LASr ≤ 8.6% 是导管消融后复发的独立预测因素。该研究纳入的为 perAF 患者,心房纤维化及僵硬程度更重,LASr 较低,但仍高于本组研究水平,这也从左心房应变的角度解释了 HCM 患者的左心房功能损害更严重、心房颤动发生率更高的原因。LASr 直接反映了左心房的顺应性,也是房颤状态下患者能获得的唯一应变参数。LASr 对房颤良好的预测效果可能与其能间接反映心肌纤维化相关,一项韩国的研究表明,LASr 与房间隔组织纤维化的比例有明显的正相关关系^[20]。Vasques 等^[21]针对 HCM 的研究通过左心房压力-容积环发现左心室充盈升高可增加左心房硬度,导致左心房组织顺应性降低,在此过程中,LASr 水平减小,且通过 LASr 可预测 HCM 患者心血管相关的复合终点事件。除此之外,磁共振成像左房应变类参数在房颤的预测中也有很好的应用前景^[22]。与 LAVi 相比,LASr 能更准确地预测左心室充盈压,欧洲协会心血管影像协会(EACVI)联合美国超声心动图学会(ASE)左室舒张功能超声评价指南^[11]指出,LASr 可为 LAVi 提供增量值,以提高超声心动图评估左心室充盈压的准确性。这提示,对于 HCM-AF 患者,LASr 更低提示心房的僵硬程度更严重/左心室舒张功能障碍更严重、导管消融后房颤复发的可能性更大。本研究还发现,NOHCM-perAF 患者术前 LASr 较低、LASct 丧失,导管消融后可获得一定程度的恢复,且无复发组的恢复趋势更为明显。虽然导管消融后复发与无复发两组 LAEF 也较术前升高,但两组差异并不明显,这可能是因为复发组术前三维左心房容积更大,消融术后左房回缩更明显,导致术后两组 LAEF 差异并不明显,但随着时间推移,在术后 1 年时,复发组的 LAEF 有更低的趋势。通过多因素回归分析显示,LASr 是复发的独立预测因素,说明相比于 LAEF,在术前房颤状态下,LASr 这一左房功能指标也许可为预测导管消融后房颤/房扑复发提供增量

价值。

综合以上,NOHCM-perAF 患者接受导管消融术后左房结构和功能显著改善,无复发患者改善趋势更为明显。术前 LASr 及三维 LAVi 有可能可以成为预测该类患者导管消融后复发的潜在影像指标。

本研究的局限性:①本研究为单中心研究,且样本量小,虽然在较为罕见的 NOHCM-perAF 队列中得出了术前三维 LAVi 及 LASr 是导管消融后房颤/房扑复发的独立预测因素,但对该结论的解读及推广需要保持谨慎态度,需依靠后续更大样本量的队列进一步验证;②肥厚型心肌病合并阵发性房颤患者仅部分会转为 perAF,与阵发性房颤相比,perAF 患者发生肥厚型心肌病相关死亡、功能损害和脑卒中的概率更高^[3],本研究仅纳入了持续性房颤患者,未来需进一步纳入阵发性房颤患者进行亚组分析和比较。

参考文献:

- [1] 国家心血管病中心心脏病专科联盟,中国医疗保健国际交流促进会心血管病精准医学会“中国成人肥厚型心肌病诊断与治疗指南 2023”专家组.中国成人肥厚型心肌病诊断与治疗指南 2023[J].中国循环杂志,2023,38(1):1-33.
- [2] Siontis KC, Geske JB, Ong K, et al. Atrial fibrillation in hypertrophic cardiomyopathy: prevalence, clinical correlations, and mortality in a large high-risk population[J]. J Am Heart Assoc, 2014, 3(3): e001002.
- [3] Olivotto I, Cecchi F, Casey SA, et al. Impact of atrial fibrillation on the clinical course of hypertrophic cardiomyopathy[J]. Circulation, 2001, 104(21): 2517-2524.
- [4] Guttman OP, Rahman MS, O'Mahony C, et al. Atrial fibrillation and thromboembolism in patients with hypertrophic cardiomyopathy: systematic review[J]. Heart, 2014, 100(6): 465-472.
- [5] Hindricks G, Potpara T, Dagres N, et al. 2020 ESC Guidelines for the diagnosis and management of atrial fibrillation developed in collaboration with the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS): The Task Force for the diagnosis and management of atrial fibrillation of the European Society of Cardiology (ESC) Developed with the special contribution of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC[J]. Eur Heart J, 2021, 42: 373-498.
- [6] Macron L, Lim P, Bensaid A, et al. Single-beat versus multibeat real-time 3D echocardiography for assessing left ventricular volumes and ejection fraction: a comparison study with cardiac magnetic resonance[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2010, 3(4): 450-455.
- [7] Ommen SR, Mital S, Burke MA, et al. 2020 AHA/ACC guideline for the diagnosis and treatment of patients with hypertrophic cardiomyopathy: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. J Am Coll Cardiol, 2020, 76(25): e159-e240.
- [8] Zhao DS, Shen Y, Zhang Q, et al. Outcomes of catheter ablation of atrial fibrillation in patients with hypertrophic cardiomyopathy: A systematic review and meta-analysis[J]. Europace, 2016, 18(4): 508-520.

- [9] Zheng S, Jiang W, Dai J, et al. Five-year outcomes after catheter ablation for atrial fibrillation in patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. J Cardiovasc Electrophysiol, 2020, 31(3): 621-628.
- [10] Creta A, Elliott P, Earley MJ, et al. Catheter ablation of atrial fibrillation in patients with hypertrophic cardiomyopathy: A European observational multicentre study[J]. Europace, 2021, 23(9): 1409-1417.
- [11] Nagueh SF, Smiseth OA, Appleton CP, et al. Recommendations for the evaluation of left ventricular diastolic function by echocardiography: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2016, 17(12): 1321-1360.
- [12] 蔡雨琪, 何健, 林静茹, 等. 三维动态心脏模型评估射血分数保留的心力衰竭患者左心房容积和功能的价值[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(2): 176-181.
- [13] 中国医师协会超声医师分会心脏超声专业委员会. 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)[J]. 中华超声影像学杂志, 2023, 32(4): 277-287.
- [14] Tzeis S, Gerstenfeld EP, Kalman J, et al. 2024 European Heart Rhythm Association/Heart Rhythm Society/Asia Pacific Heart Rhythm Society/Latin American Heart Rhythm Society expert consensus statement on catheter and surgical ablation of atrial fibrillation[J]. J Interv Card Electrophysiol, 2024, 67(5): 921-1072.
- [15] Lee JH, Cho I, Choi SH, et al. Clinical and pathophysiologic determinants of catheter ablation outcome in hypertrophic cardiomyopathy with atrial fibrillation[J]. J Arrhythm, 2024, 40(3): 479-488.
- [16] Goette A, Corradi D, Dobrev D, et al. Atrial cardiomyopathy revisited-evolution of a concept: a clinical consensus statement of the European Heart Rhythm Association (EHRA) of the ESC, the Heart Rhythm Society (HRS), the Asian Pacific Heart Rhythm Society (APHRS), and the Latin American Heart Rhythm Society (LAHRS)[J]. Europace, 2024, 26(9): euae204.
- [17] 王洪杰, 夏娟, 马小静, 等. 二维斑点追踪成像技术评估肥厚型心肌病患者左心房功能[J]. 心肺血管病杂志, 2023, 1(42): 63-68.
- [18] Zeng D, Li L, Chang S, et al. The utility of speckle tracking echocardiographic parameters in predicting atrial fibrillation recurrence after catheter ablation in patients with non-valvular atrial fibrillation[J]. Ther Clin Risk Manag, 2024, 20: 719-729.
- [19] Hanaki Y, Machino-Ohtsuka T, Aonuma K, et al. Preprocedural restoration of sinus rhythm and left atrial strain predict outcomes of catheter ablation for long-standing persistent atrial fibrillation[J]. J Cardiovasc Electrophysiol, 2020, 31(7): 1709-1718.
- [20] Her AY, Choi EY, Shim CY, et al. Prediction of left atrial fibrosis with speckle tracking echocardiography in mitral valve disease: A comparative study with histopathology[J]. Korean Circ J, 2012, 42(5): 311-318.
- [21] Vasquez N, Ostrander BT, Lu DY, et al. Low left atrial strain is associated with adverse outcomes in hypertrophic cardiomyopathy patients[J]. J Am Soc Echocardiogr, 2019, 32(5): 593-603.
- [22] 薛迪, 吴江, 李璇, 等. 心脏磁共振左房应变分析的应用进展[J]. 放射学实践, 2023, 38(6): 798-803.

· 心血管影像学专题 ·

成纤维细胞活化蛋白抑制剂 PET/CT 显像识别慢性冠脉综合征受损心肌的研究

涂斌, 王佳慧, 赵林, 席笑迎, 韩静静, 杨睿棋, 杨敏福, 王丽

【摘要】 目的:探讨¹⁸F-成纤维细胞活化蛋白抑制剂(FAPI)显像识别慢性冠脉综合征(CCS)患者受损心肌的能力。**方法:**本研究前瞻性连续纳入 2024 年 9 月 10 日—2024 年 12 月 31 日在北京朝阳医院确诊为慢性闭塞性病变的患者 72 例。所有患者均行冠状动脉造影、静息单光子发射计算机断层扫描(SPECT)心肌灌注显像(MPI)及¹⁸F-FAPI 正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(PET/CT)显像。**结果:**¹⁸F-FAPI 阳性心肌摄取范围显著大于 SPECT MPI 心肌灌注受损区[28.6%(7.8%, 45.2%) vs. 7.4%(2.9%, 13.2%), $P < 0.001$]。其中 127 支(58.8%)主要冠脉分支存在狭窄(狭窄程度 $\geq 75\%$)。与非狭窄血管相比,狭窄的血管表现出更强的 FAPI 摄取强度[TBRmax: 2.1(1.6, 3.0) vs. 2.8(2.0, 4.0), $P < 0.001$]以及更大的 FAPI 摄取范围[1.0(0.0, 9.6)% vs. 11.5(0.0, 23.2)% LV, $P < 0.001$]。FAPI 摄取范围预测冠脉重度狭窄的 AUC 为 0.67, 敏感度高于 SPECT MPI(67% vs. 52%)。**结论:**¹⁸F-FAPI 显像检测到 CCS 患者存在成纤维细胞活化的区域的范围显著大于静息 SPECT MPI。同时¹⁸F-FAPI 预测冠脉重度狭窄的敏感度更高, 有望成为 CCS 患者个体化治疗决策的辅助工具。

【关键词】 心肌缺血; 成纤维细胞活化蛋白抑制剂; 心肌灌注显像

【中图分类号】 R445; R542.2; R816.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2025)11-1370-05

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2025.11.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on fibroblast activation protein inhibitor PET/CT imaging for identifying the involved myocardium in patients with chronic coronary syndromes TU Bin, WANG Jia-hui, ZHAO Lin, et al. Department of Cardiology, Beijing Chaoyang Hospital, Capital Medical University, Beijing 100020, China

【Abstract】 Objective: This study aims to explore the ability of ¹⁸F-fibroblast activation protein inhibitor (FAPI) PET/CT imaging to identify impaired myocardium in patients with chronic coronary syndromes (CCS). **Methods:** A total of 72 patients diagnosed with CCS at Beijing Chaoyang Hospital from September 10, 2024, to December 31, 2024, were prospectively enrolled. All patients underwent coronary angiography, resting single photon emission computed tomography (SPECT) myocardial perfusion imaging (MPI), and ¹⁸F-FAPI positron emission tomography/computer tomography (PET/CT) imaging. **Results:** The range of ¹⁸F-FAPI positive myocardial uptake was significantly larger than the area of myocardial perfusion impairment detected by SPECT MPI [28.6% (7.8%, 45.2%) vs. 7.4% (2.9%, 13.2%), $P < 0.001$]. Among them, 127 major coronary artery branches (58.8%) had stenosis (degree of stenosis $\geq 75\%$). Compared with non-stenotic vessels, stenotic vessels showed stronger FAPI uptake intensity [2.1 (1.6, 3.0) vs. 2.8 (2.0, 4.0), $P < 0.001$] and a larger range of FAPI uptake [1.0 (0.0, 9.6) vs. 11.5 (0.0, 23.2), $P < 0.001$]. The area under the curve of FAPI uptake range for predicting severe coronary artery stenosis was 0.67, with higher sensitivity than SPECT MPI (67% vs. 52%). **Conclusion:** The range of areas with fibroblast activation detected by ¹⁸F-FAPI imaging in CCS patients is significantly larger than that identified by resting SPECT MPI. Meanwhile, ¹⁸F-FAPI shows higher sensitivity in predicting severe coronary stenosis, and is expected to serve as an auxiliary tool for individualized treatment decision-making in CCS patients.

作者单位: 100020 北京, 首都医科大学附属北京朝阳医院心内科/心脏中心/高血压病研究北京市重点实验室(涂斌、赵林), 核医学科(席笑迎、杨敏福、王丽); 250014 济南, 山东中医药大学(王佳慧、韩静静、杨睿棋)

作者简介: 涂斌(1991—), 男, 江西人, 博士研究生, 住院医师, 主要从事心血管诊疗工作。

通讯作者: 王丽, E-mail: lanyou925@126.com

基金项目: 北京市自然科学基金重点研究专项(Z220010)

【Key words】 Chronic coronary syndrome; Fibroblast activation protein inhibitor; Myocardial perfusion imaging

慢性冠脉综合征(chronic coronary syndrome, CCS)是一组心脏疾病的统称,包括稳定型心绞痛、缺血性心肌病、血管痉挛性心绞痛或微血管疾病患者、冠脉血运重建后的稳定患者以及无症状性冠脉疾病患者^[1]。其核心病理生理机制为冠状动脉血流储备降低或供需失衡导致的持续性心肌损伤,进而触发心室重构与心功能恶化。在 CCS 进展过程中,微循环障碍、慢性炎症、压力超负荷、能量代谢紊乱以及免疫调节失衡等多因素协同作用引发以缺血心肌为中心的病理性重构,包括钙超载与氧化应激、心肌纤维化以及左心室重构^[2]。缺血心肌范围与不良心血管事件风险正相关,早期识别可逆性缺血可指导精准血运重建,从而改善患者预后^[3,4]。成纤维细胞活化是心肌损伤修复的关键环节^[5]。研究报道,在再灌注治疗的 ST 段抬高型心肌梗死患者中,心脏成纤维细胞的活化范围远远大于水肿和梗死心肌的范围,且与心肌损伤程度及恢复期左心室收缩功能正相关^[6]。因此,精准评估受损心肌制定 CCS 个体化治疗策略及改善远期预后具有重要临床意义。

放射性核素标记的成纤维细胞活化蛋白抑制剂(fibroblast activation protein inhibitor, FAPI)是一种靶向成纤维细胞活化蛋白(fibroblast activation protein, FAP)的新型分子探针。其通过特异性结合活化成纤维细胞表面高表达的 FAP,可实现心肌成纤维细胞活化的动态可视化监测^[7,8]。研究显示,¹⁸F-FAPI 正电子发射断层扫描/计算机断层扫描(positron emission tomography/computer tomography, PET/CT)显像可特异性识别急性心肌缺血后成纤维细胞的活化部位、程度及范围,其机制区别于仅反映血流受限的单光子发射计算机断层扫描(single photon emission computed tomography, SPECT)心肌灌注显像(myocardial perfusion imaging, MPI)和检测成熟纤维化的心肌延迟强化的心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)^[6,9,10]。长期慢性缺血同样刺激成纤维细胞活化,促进心脏进行性纤维化^[11]。目前¹⁸F-FAPI 显像在慢性心肌缺血领域的研究仍是空白,本研究采用前瞻性队列设计,纳入 CCS 患者,明确¹⁸F-FAPI 显像特征,对其临床应用潜能进行初步探索。

材料与方法

1. 研究对象

本研究基于一项单中心、前瞻性、观察性研究(FACT 试验, ClinicalTrials.gov 注册号: NCT0665

5922),旨在评估多模态影像组学在指导慢性冠脉闭塞性病变评估及疗效评价中的作用。本研究于 2024 年 9 月 10 日—2024 年 12 月 31 日纳入 72 例患者。纳入标准:①年龄>18 周岁;②通过冠状动脉造影检查证实患者存在慢性冠脉闭塞性病变;③自愿参加本研究并签署知情同意书。排除标准:①肝肾功能严重受损;②预计生存期<1 年;③妊娠期或者哺乳期女性(详细标准可参考注册研究方案)。本研究通过首都医科大学附属北京朝阳医院伦理委员会审批(2024-科-772-1),所有患者均签署知情同意书。

2. 冠状动脉造影

冠状动脉造影采用 Judkins 法或桡动脉入路完成,影像数据由两名经验丰富的心脏介入医师盲法分析,使用定量冠状动脉分析(QCA)软件评估狭窄程度。狭窄程度分为四级:非显著狭窄(0~49%)、临界病变(50%~74%)、重度狭窄(75%~99%)及完全闭塞(100%)。完全闭塞病变需满足 TIMI 血流 0 级、闭塞段长度≥15 mm 且侧支循环提示病程≥3 个月。

3. ¹⁸F-FAPI PET/CT 显像及数据处理

¹⁸F-FAPI 的制备方法参照文献实施^[6]。静脉注射示踪剂(2.5~3.0 MBq/kg)60 min 后行胸部 PET/CT 显像。PET/CT 检查采用 64 排 PET/CT 扫描仪(uMI Vista, 联影)。先行定位 CT(120 kV, 10 mA)及透射 CT(120 kV, 120 mA, 螺距 1.0875, 准直器 160×0.5 mm, 层厚 2.5 mm)完成定位及衰减校正;随后进行 PET 采集(单床位, 10 min, 矩阵 512×512, 放大系数 2.0, 511 keV 能量窗)。基于 CT 数据采用 3D-OS-EM 算法(20 子集, 2 迭代)重建,获得体素 3.9 mm×3.9 mm×3.3 mm 的衰减校正图像。

视觉分析阳性定义为左心室心肌 FAPI 摄取高于心血池。PET/CT 图像整体分析采用 MEMRS 工作站(MedEx, China)。在 PET/CT 融合图像上手工勾画左心室心肌,获得勾画三维感兴趣体积(volume of interest, VOI)内的最大目标区域/背景比(target background ratio, TBRmax),将摄取大于 TBRmax 值 40%的心肌定义为摄取心肌^[6,12],获得摄取范围占左室总体积百分比(%LV)。通过 QPS 软件(3.1 版)结合冠脉造影划分 LAD/LCX/RCA 供血区,并量化各供血区内 FAPI%。

4. ^{99m}Tc-甲氧基异丁基异腈(MIBI) SPECT 心肌灌注显像及数据处理

静脉注射 925 MBq ^{99m}Tc-MIBI(原子高科股份有限公司, 北京), 60 min 后采用双探头 SPECT/CT 仪

(Infinia Hawkeye 4, GE 公司)进行图像采集。以心电图 R 波作为门控采集触发信号,每个心动周期 8 帧,20 s/帧,双探头各采集 30 帧,共 60 帧。采集条件:低能高分辨准直器,双探头夹角 90°,能峰 140 keV,窗宽 ±20%,6°/帧,采集时间 25 s/帧,矩阵 64×64,放大倍数 1.30。采用三维有序子集最大期望值迭代法(ordered-subsets expectation maximization, OSEM)重建图像(10 个子集,2 次迭代),得到短轴、垂直长轴及水平长轴的心肌断层图像。

图像采集结束后将数据传入 Xeleris 工作站。应用计算机配置的图像后处理 Cedars 软件版(quantitative perfusion SPECT, QPS; quantitative gated SPECT, QGS)(西德斯西奈医学中心,美国)自动分析并生成每位患者的靶心图。心肌灌注异常的范围及程度通过视觉及计算机半定量评分法进行评估。SPECT MPI 心肌血流灌注减低的判断标准:于 2 个轴位、连续 4 个以上层面出现相同节段放射性摄取减低或缺损。根据美国心脏病学会指南(按 17 节段分段法,各节段评分:0 分为正常灌注,1 分为计数轻度减少,2 分为计数中度减少,3 分为摄取严重减少,4 分为摄取缺失),计算 17 个节段的总分,即静息总评分(summed rest score, SRS),心肌血流灌注受损范围定义为(SRS/68)%。总灌注缺损(total perfusion defect, TPD)值越大,表示心肌血流灌注受损程度越重。左心功能参数包括收缩末期容积(end-systolic volume, EDV)、舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV)及左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)。

5.统计学处理

采用 SPSS 软件(版本 27)进行统计学分析。符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,不符合正态分布的定量资料以 M(Q1, Q3)表示。定性资料以频数(百分比)表示。两组间定量资料的比较采用两独立样本 t 检验或 Mann-Whitney U 检验。采用 Spearman 相关性分析明确指标间相关系数以及相关显著性 P 值。采用受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线计算各显像方式的曲线下面积(area under curve, AUC)、敏感度、特异度及最佳截断值。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1.基线特征

72 例患者平均年龄 58.5 ± 10.4 岁,男性 56 例,女性 16 例,平均 BMI (25.5 ± 3.4) kg/m²。高血压 46 例(63.9%),糖尿病 23 例(31.9%),心功能不全 13 例(18.1%)。门控 SPECT MPI 测量左室射血分数为 $64.3\% \pm 14.1\%$,左室舒张末容积 79(70, 99) mL,左室收缩末容积 27(19, 42) mL。灌注缺损心肌占 7.4%(2.9%, 13.2%)。¹⁸F-FAPI 显像摄取范围为 28.6%(7.8%, 45.2%) LV, TBRmax 为 3.3(2.4, 4.7)。13 名患者心功能不全。

2.¹⁸F-FAPI 显像特征

72 例患者中,69 例(93%)患者左心室心肌存在不同程度的¹⁸F-FAPI 摄取(图 1),摄取范围中位数为 28.6%(7.8%, 45.2%) LV,最大为摄取范围为 84.9% LV。门控静息 MPI 检测到 57 例(79%)患者存在心肌血流灌注减低,灌注受损范围中位数为 7.4%(2.9%, 13.2%) LV,最大为 33.8% LV。¹⁸F-FAPI PET/CT 显像阳性率显著高于 SPECT MPI($\chi^2 = 5.8$, $P = 0.016$)。¹⁸F-FAPI 摄取范围显著大于 SPECT MPI 检测到的灌注受损心肌($Z = -6.9$, $P < 0.001$, 图 2)。¹⁸F-FAPI 的摄取范围大于 SPECT MPI 所示的血流灌注受损区范围。

冠脉造影结果显示,127 根(58.8%)主要血管重度及以上狭窄,其¹⁸F-FAPI 显像 TBRmax 更高[2.8(2.0, 4.0) vs. 2.1(1.6, 3.0), $Z = -4.4$, $P < 0.001$],同时摄取范围更大[11.5(0.0, 23.2) vs. 1.0(0.0, 9.6), $Z = -3.5$, $P < 0.001$]。在血管层面上分析(表 1),¹⁸F-FAPI 摄取阳性组中冠脉慢性闭塞性病变为主 65 例(占 46.8%),高于无¹⁸F-FAPI 摄取组的 15 例(19.5%)($\chi^2 = 15.8$, $P < 0.001$)。¹⁸F-FAPI 摄取阴性组以轻度及中度冠脉狭窄为主,然而¹⁸F-FAPI 摄取阳

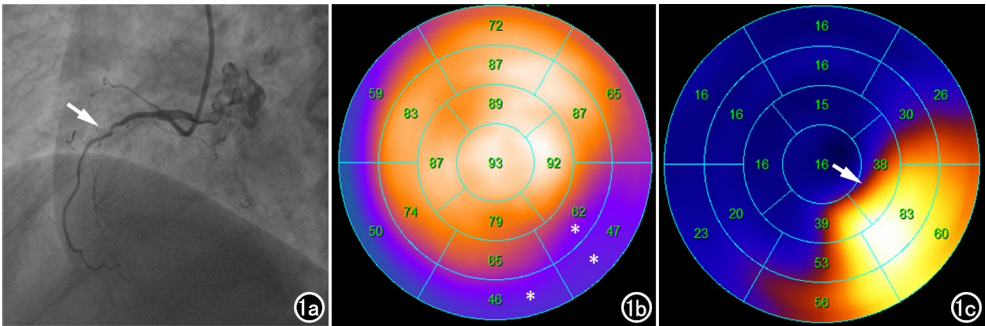


图 1 女,71 岁,慢性冠脉综合征。a)冠脉造影提示右冠近端完全闭塞性病变(箭);b)SPECT MPI 显示下壁基底段、下侧壁中段和基底段心肌血流灌注减低(*);c)¹⁸F-FAPI 显像观察到下壁基底段、部分下壁中段和心尖段、下侧壁中段和基底段、前侧壁部分中段和基底段以及侧壁心尖段(箭)。

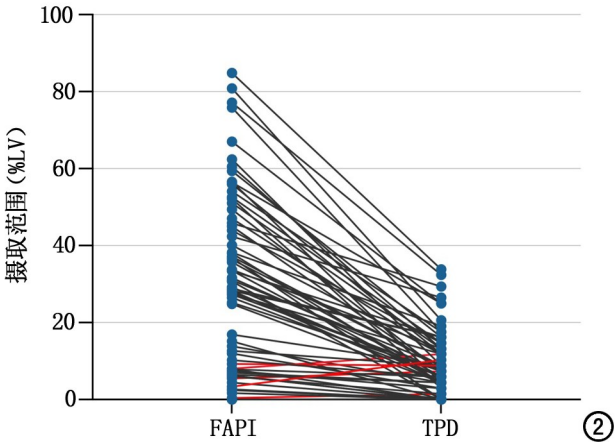


图2 ¹⁸F-FAPI 以及 SPECT MPI 灌注缺损范围的差异。其中黑线代表患者 FAPI 显像范围大于 SPECT MPI 灌注缺损范围,红线代表患者 FAPI 显像范围小于 SPECT MPI 灌注缺损范围。

性组则以重度狭窄及以上病变为主。与 FAPI 摄取阴性组相比,FAPI 摄取阳性组中灌注缺损范围中位数更大(0%比 4.4%, $Z=-5.9,P<0.001$)。

3.¹⁸F-FAPI PET/CT 显像对冠脉重度及以上狭窄程度的预测价值

¹⁸F-FAPI 的摄取范围和 SEPCT MPI 灌注缺损心肌范围高度相关($r=0.73,P<0.001$)。同时,¹⁸F-FAPI 的摄取范围($r=0.34,P<0.001$)以及摄取强度($r=0.28,P<0.001$)和狭窄等级存在相关。FAPI%LV 预测冠脉重度及以上狭窄($\geq 75\%$)的 AUC 为 0.67(95% CI:0.60~0.75),阈值为 4.3%,敏感度为 67%,特异度为 62%;而 SPECT MPI 的 AUC 为 0.64(95%CI:0.56~0.71),阈值为 0%,敏感为 52%,特异度为 74%(表 2)。

讨 论

既往研究显示 FAPI 在心肌急性缺血后持续摄取^[12-14],但是其在慢性心肌缺血中的显像特征尚未被报道。本研究发现,¹⁸F-FAPI 显像在 CCS 患者慢性心肌缺血中显示特征性摄取,为优化现有受损心肌评估体系提供了新视野。

本研究中,¹⁸F-FAPI 的摄取范围与心肌灌注显像范围以及冠脉狭窄均相关,均提示¹⁸F-FAPI 摄取和慢性缺血亦相关。这一结果与 FAP 表达的生物学特性一致,源于 FAP 在缺血后修复中的核心作用^[15-18]。动物研究显示,心肌缺血事件后 2~4 天,FAP 迅速上调,与炎症反应及胶原沉积同步发生^[15,19]。

¹⁸F-FAPI 显像心肌摄取范围显著大于 SPECT 灌注缺损范围,提示其对于缺血性相关损伤评估更加完全。这种探查范围差异归因于两者机制的本质差异。在慢性缺血状态下,持续性低氧、炎症因子释放、机械应力改变等因素持续刺激心肌间质中的成纤维细胞活化^[16,17]。这些活化的成纤维细胞不仅存在于明显的灌注缺损区,也存在于血流轻度减低或代谢异常的区域,甚至可能出现在因侧支循环代偿而未表现出明显灌注异常的心肌区域^[15-18]。FAPI 显像正是捕捉了这种广泛存在的、活性状态的成纤维细胞活化过程,揭示了慢性缺血对心肌组织更广泛的“分子层面”影响。然而 SPECT MPI 则是针对血流的评估。当然 FAPI 的成像机制也显著有别于 CMR。CMR 延迟强化是识别成熟、致密胶原沉积的卓越工具,而 FAPI 显像则聚焦于活性成纤维细胞活化过程,代表了纤维化形成的前期和动态阶段^[12]。动物研究显示,FAP 在梗死区外 2~3 mm 的炎症反应区也出现高表达^[15]。基于人的研究也提示¹⁸F-FAPI 摄取范围与 CMR 定义的 T₂ 高信号区(水肿带)高度重叠,面积较延迟强化所示的瘢痕

表1 CCS 患者血管层面左心室心肌¹⁸F-FAPI 摄取与冠状动脉狭窄程度之间的关系

左心室检查结果	FAPI 摄取阴性 (n=77)	FAPI 摄取阳性 (n=139)	统计量	P 值
灌注缺损心肌(%)	0.0(0.0,0.0)	4.4 (0.0,8.8)	$Z=-5.9$	<0.001
存在狭窄	58 (75.3%)	113 (81.3%)	$\chi^2=1.1$	0.301
冠脉狭窄程度				
0~49%(n=45)	19 (24.7%)	26 (18.7%)	$\chi^2=1.1$	0.301
50%~74%(n=44)	25 (32.5%)	19 (13.7%)	$\chi^2=10.8$	0.001
75%~99%(n=47)	18 (23.4%)	29 (20.9%)	$\chi^2=0.2$	0.668
100%(n=80)	15 (19.5%)	65 (46.8%)	$\chi^2=15.8$	<0.001

表2 比较 FAPI 显像和 SPECT MPI 对冠状动脉重度及以上狭窄的预测效能

检查方法	阈值	预测效能(95%CI)				
		AUC	特异度/%	敏感度/%	阳性预测值/%	阴性预测值/%
SPECT MPI	0%LV	0.64(0.56~0.71)	74(63~82)	52(43~60)	75(65~83)	50(41~59)
¹⁸ F-FAPI	4.3%LV	0.67(0.60~0.75)	62(52~72)	67(58~75)	72(63~79)	56(46~66)

注:CI,置信区间。

痕区显著扩大^[6]。此外,此研究还显示 FAPI 与狭窄程度的相关性略高于 SPECT。相较于依赖血流 SPECT,¹⁸F-FAPI 通过分子层面的精准标记,避免了继发性干扰,这可能是其敏感性优势的关键机制^[20]。

心肌纤维化是心脏损伤修复的核心机制,与远期预后高度相关^[11]。¹⁸F-FAPI 作为评估纤维化的敏感手段,在 ACS 患者中展现出良好的心室重构预测价值^[12]。然而,其对于 CCS 临床终点的预测价值,以及能否成为指导再灌注治疗的新标志物,仍需进一步研究证实。尽管在诊断价值上¹⁸F-FAPI 优于 SPECT,但其作为单一指标对心肌缺血的探查效能仍显不足,探索¹⁸F-FAPI 联合其他临床指标构建复合模型以提升诊断价值,是未来重要的研究方向。

本研究具有一定的局限性:研究仅纳入单一中心的 72 例患者,样本量相对较小且可能存在选择偏倚,限制了结果的普遍性,需进一步通过更大样本量多中心研究进行验证。SPECT MPI 未结合负荷试验,可能导致对心肌缺血检测范围的敏感性不足。同时由于 FAPI 探查缺血的机制为探查活化的成纤维细胞,因此其探查是否存在时间窗也需要在未来的研究中进一步验证。研究未分析 FAPI 阳性摄取与患者长期临床结局(如心血管事件)的关联,其临床意义需进一步验证。

¹⁸F-FAPI PET/CT 显像可以检测到静息状态下 CCS 患者血流灌注减低区域外更多的受损心肌,优于传统静息 SPECT MPI 技术。未来,¹⁸F-FAPI 有望成为冠心病影像诊断的重要革新,助力个体化治疗策略的制定。

参考文献:

- [1] Virani SS, Newby LK, Arnold SV, et al. 2023 AHA/ACC/ACCP/ASPC/NLA/PCNA guideline for the management of patients with chronic coronary disease: A report of the American Heart Association/American College of Cardiology Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. J Am Coll Cardiol, 2023, 82(9): 833-955.
- [2] Flores-Vergara R, Olmedo I, Aránguiz P, et al. Communication between cardiomyocytes and fibroblasts during cardiac ischemia/reperfusion and remodeling: roles of TGF- β , CTGF, the renin angiotensin axis, and non-coding RNA molecules[J]. Front Physiol, 2021, 12: 716721.
- [3] Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization[J]. Eur Heart J, 2019, 40(2): 87-165.
- [4] Galassi AR, Vadalà G, Werner GS, et al. Evaluation and management of patients with coronary chronic total occlusions considered for revascularisation. A clinical consensus statement of the European Association of Percutaneous Cardiovascular Interventions (EAPCI) of the ESC, the European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI) of the ESC, and the ESC Working Group on Cardiovascular Surgery[J]. Euro Intervention, 2024, 20(3): e174-e184.
- [5] Kleinbongard P, Senyo SE, Lindsey ML, et al. Cardiac fibroblasts: answering the call[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2024, 327(3): H681-H686.
- [6] Xie B, Wang J, Xi XY, et al. Fibroblast activation protein imaging in reperfused ST-elevation myocardial infarction: comparison with cardiac magnetic resonance imaging[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2022, 49(8): 2786-2797.
- [7] Higuchi T, Serfling SE, Leistner DM, et al. FAPI-PET in cardiovascular disease[J]. Semin Nucl Med, 2024, 54(5): 747-752.
- [8] Wang L, Wang Y, Wang J, et al. Myocardial activity at ¹⁸F-FAPI PET/CT and risk for sudden cardiac death in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Radiology, 2023, 306(2): e221052.
- [9] 夏黎明. 心脏 MRI 新技术[J]. 放射学实践, 2001, 14(1): 64.
- [10] 王文斌, 李裕丹, 陈秋智, 等. 心脏磁共振 T₂* WI 在检测心肌梗变中的临床应用[J]. 放射学实践, 2017, 32(11): 1205-1208.
- [11] Frangogiannis NG. Cardiac fibrosis[J]. Cardiovasc Res, 2021, 117(6): 1450-1488.
- [12] Barton AK, Craig NJ, Loganath K, et al. Myocardial fibroblast activation after acute myocardial infarction: A positron emission tomography and magnetic resonance study[J]. J Am Coll Cardiol, 2025, 85(6): 578-591.
- [13] Yuan T, Wang X. ⁶⁸Ga-FAPI PET/MRI in coronary heart disease[J]. J Nucl Cardiol, 2022, 29(6): 3608-3610.
- [14] Cui Y, Wang Y, Wang S, et al. Highlighting fibroblasts activation in fibrosis: the state-of-the-art fibroblast activation protein inhibitor PET imaging in cardiovascular diseases[J]. J Clin Med, 2023, 12(18): 6033.
- [15] Diekmann J, Koenig T, Zwadlo C, et al. Molecular imaging identifies fibroblast activation beyond the infarct region after acute myocardial infarction[J]. J Am Coll Cardiol, 2021, 77(14): 1835-1837.
- [16] Pang P, Si W, Wu H, et al. The circular RNA circHelz enhances cardiac fibrosis by facilitating the nuclear translocation of YAP1[J]. Transl Res, 2023, 257: 30-42.
- [17] Varasteh Z, Mohanta S, Robu S, et al. Molecular imaging of fibroblast activity after myocardial infarction using a ⁶⁸Ga-labeled fibroblast activation protein inhibitor, FAPI-04[J]. J Nucl Med, 2019, 60(12): 1743-1749.
- [18] Kupusovic J, Kessler L, Kazek S, et al. Delayed ⁶⁸Ga-FAPI-46 PET/MR imaging confirms ongoing fibroblast activation in patients after acute myocardial infarction[J]. Int J Cardiol Heart Vasc, 2024, 50: 101340.
- [19] Qiao X, Wang H, Meng H, et al. Multi-modality deep learning-based [⁶⁸Ga] Ga-DOTA-FAPI-04 PET polar map generation: potential value in detecting reactive fibrosis after myocardial infarction[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 51(13): 3944-3959.
- [20] Kessler L, Kupusovic J, Ferdinandus J, et al. Visualization of fibroblast activation after myocardial infarction using ⁶⁸Ga-FAPI PET[J]. Clin Nucl Med, 2021, 46(10): 807-813.

· 心血管影像学专题 ·

抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者心脏受损的多参数磁共振研究

张凌, 蒲晓琪, 戴金竹, 刘安琪, 舒晓明, 刘敏

【摘要】 目的:采用心脏磁共振(CMR)mapping 技术评估抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者的左、右心室功能损害情况。**方法:**前瞻性纳入 20 例抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者和 20 名健康对照者。所有参与者均接受 CMR 扫描,测量左、右心室功能参数,左心室心肌及左、右心室的 T_1 和 T_2 值、右心室长轴应变(RV-LAS)以及右心室重构指数(RVESRI)。采用独立样本 t 检验和 Pearson 相关分析进行统计学分析。**结果:**抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者的左心室心肌 T_1 及 T_2 值显著高于健康对照组($P < 0.05$)。与健康对照组相比,抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者的左、右室功能显著降低($P < 0.05$),左、右心室腔血池 T_1 值及其比值、右心室收缩末期容积指数(RVESVI)、RVESRI 及 RV-LAS 均显著升高($P < 0.05$)。**结论:**CMR 结果提示抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者存在亚临床心脏损害。CMR 可能为无创评估抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者心脏并发症提供重要信息。

【关键词】 抗 MDA5 抗体阳性皮炎;心脏磁共振;心室功能

【中图分类号】 R445.2;R593.26 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2025)11-1375-08

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2025.11.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A multiparametric magnetic resonance study on cardiac impairment in patients with anti-MDA5 antibody-positive dermatomyositis ZHANG Ling, PU Xiao-qi, DAI Jin-zhu, et al. Department of Radiology, China-Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China

【Abstract】 Objective: To evaluate left and right ventricular functional impairment in patients with anti-MDA5 antibody-positive dermatomyositis (anti-MDA5 Ab+ DM) using cardiac magnetic resonance (CMR) imaging. **Methods:** This prospective study included 20 patients with anti-MDA5 Ab+ DM and 20 healthy controls. All participants underwent CMR scanning to measure left and right ventricular functional parameters, T_1 and T_2 values of the left ventricular myocardium as well as the left and right ventricles, right ventricular long-axis strain (RV-LAS), and right ventricular end-systolic remodeling index (RVESRI). Statistical analysis was performed using independent samples t -test and Pearson correlation analysis. **Results:** The left ventricular myocardial T_1 and T_2 values in patients with anti-MDA5 Ab+ DM were significantly higher than those in the healthy controls ($P < 0.05$). Compared with healthy controls, patients with anti-MDA5 Ab+ DM showed significant reductions in both left and right ventricular function ($P < 0.05$), along with significant increases in the T_1 values of the left and right ventricular cavity blood pools and their ratio, right ventricular end-systolic volume index (RVESVI), RVESRI and RV-LAS ($P < 0.05$). **Conclusion:** CMR findings suggest the presence of sub-clinical cardiac impairment in patients with anti-MDA5 antibody-positive dermatomyositis. CMR may provide important information for the non-invasive assessment of cardiac complications in patients with anti-MDA5 antibody-positive dermatomyositis.

【Key words】 Anti-MDA5 antibody-positive dermatomyositis; Cardiac magnetic resonance; Ventricular function

皮炎(dermatomyositis, DM)是一类原因不明

的自身免疫性疾病,也是以侵犯横纹肌为主的炎性肌病,可累及其他许多器官。随着肌炎特异性抗体(myositis specific autoantibodies, MSAs)的发现,DM 亚型分类得到了进一步细化,抗黑色素瘤分化相关基因 5 (melanoma differentiation - associated gene 5 ,

作者单位:100029 北京,中日友好医院放射诊断科(张凌、蒲晓琪、戴金竹、刘敏),风湿免疫科(舒晓明);100730 北京,中国医学科学院 & 北京协和医学院(刘安琪)

作者简介:张凌(1985—),女,江苏人,博士研究生,主治医师,主要从事心血管和胸部影像诊断工作。

通讯作者:刘敏, E-mail: mikie0763@126.com

MDA5)抗体在 2005 年首次被发现。抗 MDA5 抗体阳性皮炎(抗 MDA5+ DM)患者的死亡率较高,与快速进展性间质性肺病(rapidly progressive interstitial lung disease, RP-ILD)的有着强关联^[1-3]。尽管抗 MDA5+ DM 患者间质性肺病已得到充分报道,然而,心脏受累却是一个未被充分认识且可能威胁生命的表现。现有研究表明,抗 MDA5+ DM 的心肌受累并不罕见,可能是这些患者高死亡率的另一个重要原因^[4],这些患者的心脏表现可以从心肌炎、心包炎到传导异常^[5]等。然而,由于缺乏使用先进影像学技术的系统性研究,抗 MDA5+ DM 患者中的心肌受累患病率和临床意义仍未得到充分理解。此外,右心室功能障碍是多种心血管疾病不良预后的重要独立预测因素^[6,7]。然而,相较于左心室,右心室形态更不规则,运动模式更加复杂,因此准确评估其功能,尤其是亚临床功能障碍,存在一定挑战。

心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)成像是评估心肌结构和功能的金标准,尤其是在检测心肌病变如炎症和纤维化方面具有重要优势。CMR 技术中的 T_1 -mapping 和 T_2 -mapping 技术可为心肌组织特性提供定量评估,已被证明在诊断心肌炎和其他心肌病理上具有重要价值^[8]。Arenja 等^[9]和 Shang 等^[10]研究表明,长轴应变(long-axis strain, LAS)可作为评估非缺血性扩张型心肌病和 2 型糖尿病患者右心室功能的精准且简便的指标。Zhang 等^[11]研究发现,CMR 测的右心室收缩末期建模指数是一项简单、可重复的参数,可用于评估慢性血栓栓塞性肺动脉高压患者的右心室功能障碍和血流动力学状况。此外,Emrich 等^[12]研究指出, T_2 -mapping 不仅仅对于心肌水含量的变化敏感,它对血液氧合水平也非常敏感,右心室和左心室血池 T_2 比值可用于评估已知左向右分流患者的分流量。由于抗 MDA5+ DM 患者多数存在肺间质纤维化,肺间质纤维化通过影响肺泡和血管之间的气体交换、通气血流不匹配、肺容积减小和气道重塑等机制,对肺氧合产生显著的负面影响。Deng 等^[13]提出,右心室与左心室血池 T_2 比值可能成为额外的 CMR 影像学指标,有助于评估肺动脉高压患者的右心室功能障碍和血流动力学变化。因此,本研究旨在使用多参数 CMR 技术评估抗 MDA5+ DM 患者的左、右心室受累的情况。

材料与方法

1. 研究对象

前瞻性纳入 2022 年 5 月—2024 年 5 月 20 就诊于本院风湿免疫科的抗 MDA5 抗体阳性皮炎的 30 例患者。皮炎的诊断依据为第 239 届 ENMC 国际

研讨会标准^[14]。排除标准:①因呼吸伪影或严重心律失常导致 CMR 图像质量差;②有冠状动脉支架植入或冠状动脉旁路移植手术史;③已知或疑似存在感染;④有先天性心脏病、冠心病、心肌病或恶性肿瘤病史;⑤患有其他类型结缔组织病或存在肌炎特异性自身抗体;⑥患有甲状腺功能减退、肾功能或肝功能不全。最终纳入 20 例抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者,入组流程见图 1。患者病程 10~18 个月,所有患者接受了平扫和增强 CMR 检查。同时还招募了 20 例年龄和性别匹配、心电图和超声心动图检查结果正常的志愿者,作为健康对照(healthy control, HC)组。健康对照组仅接受了 CMR 平扫检查。本研究获得中日友好医院伦理委员会批准(伦理号:2021-KY-060)。

2. 检查方法

采用 Siemens Aera 1.5T MR 扫描仪,18 通道体线圈。采用平衡稳态自由进动序列呼吸门控加心电门控,行心脏短轴、长轴四腔心及左心室长轴两腔心、三腔心层面心脏电影序列扫描,短轴位采集 6~8 层;利用真实稳态进动快速成像序列对心脏短轴、长轴四腔心及左心室长轴两腔心进行 T_1 及 T_2 -mapping 扫描。扫描参数:TR 293.27 ms, TE 1.06 ms,翻转角 70° ,层厚 8.0 mm,体素 $1.9\text{ mm} \times 1.9\text{ mm} \times 8.0\text{ mm}$, T_2 准备:0 ms、25 ms、55 ms,分辨率 192×144 ,并行采集因子 2,带宽 1184 Hz。

3. 分析方法

CMR 图像处理及测量:CMR 图像以 DICOM 格式传输至 Siemens SyngoVia 工作站。根据 AHA 16 段模型^[15](图 2),通过两位心脏影像学放射科医师手动在 T_1 和 T_2 图上测量左心室(left ventricle, LV)心肌的 T_1 和 T_2 值,测量过程分别进行两次,最后取两次测量值的平均值作为心肌的 T_1 和 T_2 值。基于舒张末期和收缩末期的串联短轴平面图像,使用 CardiacFunction 自动处理心内膜和心外膜的轮廓,并自动分析包括左、右心室舒张末期和收缩末期容积指数(end-diastolic and end-systolic volume index, EDVI/

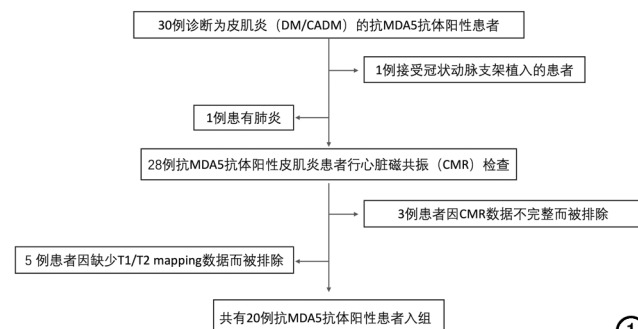


图 1 病例入组流程图。

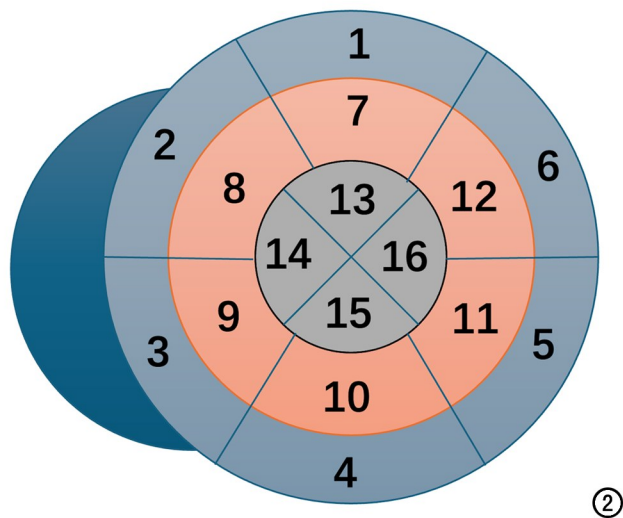


图2 左心室16段靶心图。

ESVI)及射血分数(ejection fraction, EF)等左心室指标。

右心室-长轴应变:根据 Arenja 等^[9]的研究,右心室长轴应变(right ventricular long-axis strain, RV-LAS)是在四腔心图像上评估三尖瓣环位移,分别在收缩末期和舒张末期测量长轴距离,计算收缩末期相对舒张末期的变化率:

$$RV-LAS = \frac{Length_{ES} - Length_{ED}}{Length_{ED}} \times 100\%$$

其中 $Length_{ES}$ 为收缩末期长轴距离, $Length_{ED}$ 为舒张末期长轴距离。测量由两位具有 10 年经验的心血管影像学放射科医师完成(图 3)。RV-LAS_{Ins/peri}:测量右心室和左心室交界处心外膜边缘(点 1)与三尖瓣外侧点(点 2)之间的距离;RV-LAS_{Ins/mid}:测量右心室和左心室交界处心外膜边缘(点 1)与连接三尖瓣叶片

起始点的直线中点(点 3)之间的距离;RV-LAS_{L.Vapex/peri}:测量左心室尖端心外膜边缘(点 4)与三尖瓣外侧点(点 2)之间的距离;RV-LAS_{L.Vapex/mid}:测量左心室尖端心外膜边缘(点 4)与连接三尖瓣叶片起始点的直线中点(点 3)之间的距离。

右心室重构指数测量:右心室舒张末期重构指数(right ventricular end diastolic remodeling index, RVEDRI)和右心室收缩末期重构指数(right ventricular end systolic remodeling index, RVESRI)是指在收缩末期和舒张末期阶段,右室外侧壁长度与间隔壁高度的比值。该比值在 CMR 长轴四腔心动态影像上进行测量(图 4),测量由一位心血管影像学放射科医师完成。

心室血池 T_1 和 T_2 -mapping 测量:在四腔心 T_2 -mapping 自动生成的伪彩图上沿心内膜勾画左心室和右心室感兴趣区,重复测量 3 次右心室腔血池 T_1 、 T_2 (RVT₁、RVT₂)及左心室腔血池 T_1 、 T_2 值(LVT₁、LVT₂),计算平均值。绘制感兴趣区时避开心肌及乳头肌。最后计算 RVT₁/LVT₁ 及 RVT₂/LVT₂^[13]。

4. 统计学分析

采用 SPSS 29.0、MedCalc 15.0 和 GraphPad Prism 10.4.1 进行统计学分析和绘图。对抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者和正常对照组间数据进行比较:正态分布计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用独立样本 t 检验;非正态分布计量资料采用 Mann-Whitney U 检验;计数资料以例数表示,采用 χ^2 检验。采用相关性分析评估变量之间的关系。对于正态分布数据采用 Pearson 相关分析,非正态分布数据采用 Spearman 秩相关分析。观察者间数据一致性和左、右心室 3 次测量 T_2 值的一致性采用组内相关系数(ICC)进行评估:ICC

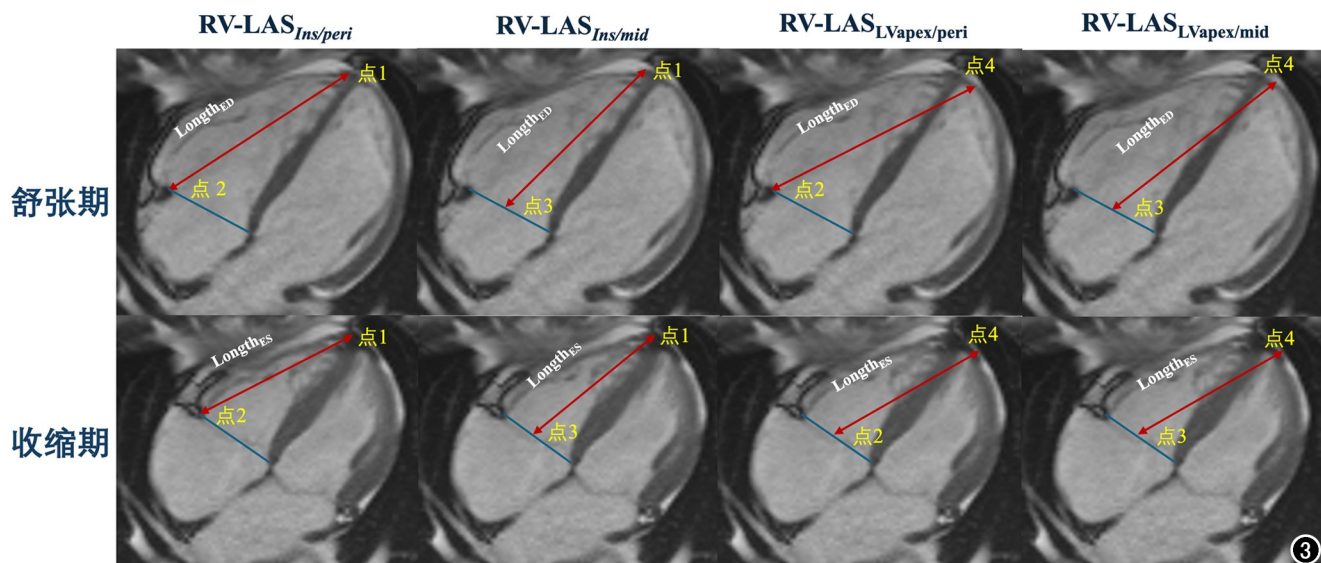


图3 RV-LAS 测量示意图,红色双向箭头为所测的长轴距离。

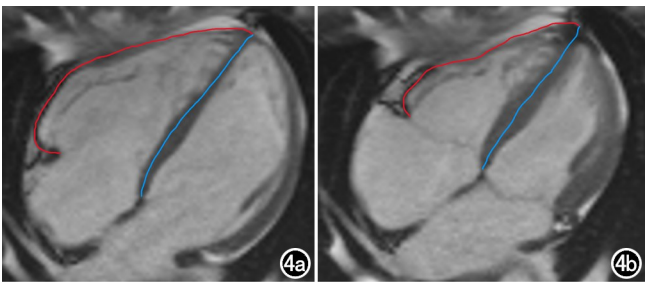


图 4 RVEDRI 和 RVESRI 在 CMR 的四腔切面动态图像上的测量示意图,RVEDRI 和 RVESRI 是左心室侧壁长度(红线)与室间隔高度(蓝线)的比值。a)RV-EDRI 测量示意图;b)RVESRI 测量示意图。

值 <0.5 为可靠性差, $0.5\sim0.75$ 为可靠性中等, $0.75\sim0.9$ 为可靠性好, >0.90 为可靠性优异^[16]。以 $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

1.临床资料
本研究纳入 40 名参与者,其中包括 20 例抗 MDA5 抗体阳性皮肌炎患者(男性 10 例,平均年龄 46.0 ± 13.7 岁)和 20 例健康对照组(男性 11 例,平均年龄 45.0 ± 10.8 岁)。抗 MDA5 抗体阳性组和健康对照组的基线资料见表 1。临床症状和检查:胸闷 2 例(10%),无胸痛、心律失常和心电图异常;细胞因子阳性 11 例(55%);血沉(73 ± 23.1)mm/h,铁蛋白(647.2 ± 537.3)ng/mL,乳酸脱氢酶(287.6 ± 151.9)U/L,NT-pro-BNP(N 末端脑钠肽前体)(106.2 ± 68.9)pg/mL;肺间质纤维化 19 例(95%)。治疗用药采用免疫抑制剂 20 例(100%)、激素 20 例

(100%)、生物制剂 9 例(45%)。
抗 MDA5 抗体阳性患者的 D-二聚体水平高于健康对照组($P<0.001$),其他临床资料在两组之间差异无统计学意义。

表 1 两组基本信息和临床资料比较

基线资料	抗 MDA5 抗体阳性组	健康对照组	χ^2/t	P 值
男性/例(%)	10(50%)	11(55%)	0.061	0.638
年龄/岁	46.0 ± 13.7	45.0 ± 10.8	0.244	0.404
BMI/kg/m ²	22.1 ± 2.7	21.3 ± 3.4	-0.071	0.328
舒张压/mmHg	120.2 ± 12.9	127.1 ± 9.9	-0.925	0.139
收缩压/mmHg	74.3 ± 10.0	80.0 ± 6.8	-1.050	0.677
hsTnI/ng/mL	0.0154 ± 0.04	0.0066 ± 0.002	0.891	0.384
CK-MB/U/L	16.7 ± 6.3	14.9 ± 5.1	1.247	0.356
D-dimer/mg/L	0.74 ± 0.1	0.31 ± 0.3	5.374	$<0.001^{**}$

注:hsTnI,高敏感肌钙蛋白 I;CK-MB,肌酸激酶同工酶 MB;D-dimer,D-二聚体;** $P<0.001$,* $P<0.05$ 。

2.左、右心室功能

与健康对照组相比,抗 MDA5 抗体阳性皮肌炎患者的左心室 EF 及心脏指数(cardiac index,CI)均显著降低($P<0.05$);右心室 EF 明显降低,右心室收缩末期容积指数(RVESVI)显著升高($P<0.05$),见表 2。

3.左室心肌 T₁ 和 T₂-mapping 及左、右心室 T₁ 和 T₂ 值

抗 MDA5 抗体阳性皮肌炎患者的左心室心肌平均 T₁ 值和 T₂ 值均显著高于健康对照组($P<0.05$,表 2)。抗 MDA5 抗体阳性皮肌炎患者的 RVT₁、LVT₁ 和 RVT₁/LVT₁ 比值均高于对照组($P<0.05$),但两组间 RVT₂、LVT₂ 和 RVT₂/LVT₂ 比值没有显著统计学差异。

4.右心室重塑指数及右心室应变

抗 MDA5 抗体阳性皮肌炎患者与健康对照组 RVESRI 之间差异有统计学意义($P<0.05$,表 2)。对于右心室应变(RV-LAS)的四项指标,抗 MDA5 抗体阳性皮肌炎患者的右心室应变均明显增高($P<0.05$,表 2,图 6)。

5.左、右心室参数与临床数据的相关性分析

在抗 MDA5 抗体阳性患者中,RV-LASLV_{apex/peri}与肌酸激酶(CKMB)水平呈中等负相关($r=-0.502,P=0.024$);RV-LAS_{ins/mid}与高敏感肌钙蛋白 I(hsTnI)水平呈中等负相关($r=-0.586,P=0.007$),左心室心肌 T₁-mapping 值与 CKMB 水平呈中等正相关($r=0.648,P=0.002$),RVESRI 与右心室射血分数(right ventricular ejection fraction,RVEF)呈中等正相关($r=0.516,P=0.020$)。其他右心室功能参数与临床数据之间没有显著相关性(图 7)。

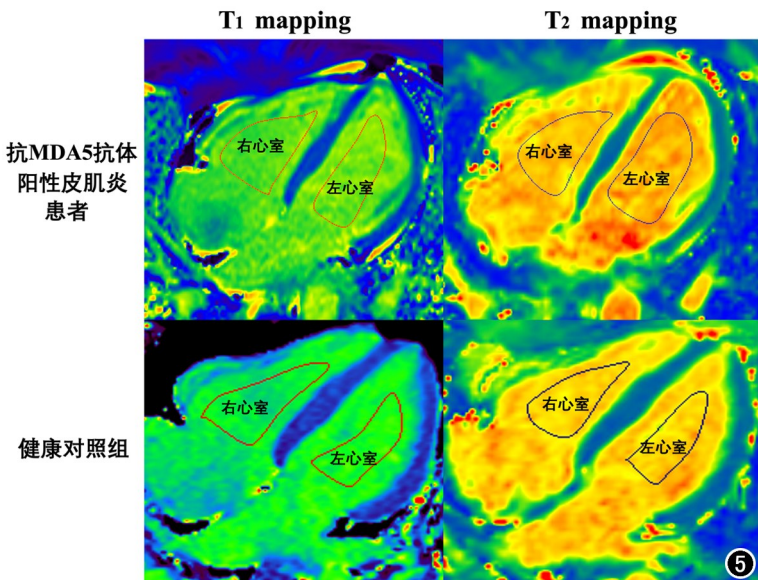


图 5 在抗 MDA5 抗体阳性皮肌炎患者和健康对照组的四腔心脏视图中,测量右心室和左心室血池的 T₁ 和 T₂ 弛豫时间。

表 2 两组间心功能和 CMR 参数的比较

CMR 参数	抗 MDA5 抗体 阳性组	健康对照组	χ^2/t	P
左心室心肌 T_1 值/ms	1055.3±17.5	1025.7±33.1	3.528	<0.001**
左心室心肌 T_2 值/ms	52.4±3.6	49.3±3.0	2.976	0.003
左心室功能				
EF/%	61.4±6.0	67.3±5.5	-2.713	0.010*
EDVI/mL/m ²	55.6±12.0	60.7±9.3	-1.867	0.248
ESVI/mL/m ²	22.2±6.7	22.4±6.8	-0.094	0.926
CI/L/min/m ²	2.6±0.5	3.0±0.5	-3.117	0.004*
右心室功能				
EF/%	45.8±4.6	50.2±4.7	-2.993	0.005*
EDVI/mL/m ²	63.7±24.2	61.1±10.0	0.459	0.650
ESVI/mL/m ²	36.0±4.8	30.3±5.1	3.631	0.023*
SVI/mL/m ²	29.2±10.6	30.8±6.5	-0.591	0.559
CI/L/min/m ²	2.4±0.8	2.2±0.6	0.619	0.540
右心室重构指数				
RVEDRI	1.60±0.14	1.60±0.13	0.035	0.972
RVESRI	1.37±0.15	1.27±0.14	3.417	0.027*
RV-LAS				
RV-LAS _{ins/peri} /°	-23.6±7.3	-27.2±5.3	2.251	0.039*
RV-LAS _{ins/mid} /°	-23.4±5.1	-27.9±5.1	2.312	0.027*
RV-LAS _{L.Vapex/peri} /°	-17.4±5.1	-20.5±6.1	2.825	0.019*
RV-LAS _{L.Vapex/mid} /°	-17.4±3.7	-20.0±5.5	2.425	0.021*
心室血池 T_1/T_2 -mapping				
RVT ₁ /ms	1533.9±91.8	1473.5±111.3	2.872	0.013*
LVT ₁ /ms	1595.8±73.9	1555.7±71.4	2.226	0.027*
RVT ₁ /LVT ₁ 比值	0.96±0.02	0.94±0.03	2.254	0.021*
RVT ₂ /ms	139.1±19.3	133.9±12.6	1.001	0.324
LVT ₂ /ms	159.8±26.9	156.6±17.5	0.439	0.664
RVT ₂ /LVT ₂ 比值	0.89±0.14	0.86±0.07	0.732	0.470

注:EDVI,舒张末期容积指数;ESVI,收缩末期容积指数;CI,心脏指数;RVEDRI,右心室舒张末期重构指数;RVESRI,右心室收缩末期重构指数;RV-LAS,右心室-长轴应变; ** $P<0.001$, * $P<0.05$ 。

讨 论

本研究首次采用 CMR 成像技术对抗 MDA5 抗

体阳性皮炎患者进行心脏功能及形态评估,与健康对照组进行比较。研究结果表明,抗 MDA5 抗体阳性皮炎患者的左心室和右心室功能均显著受损。

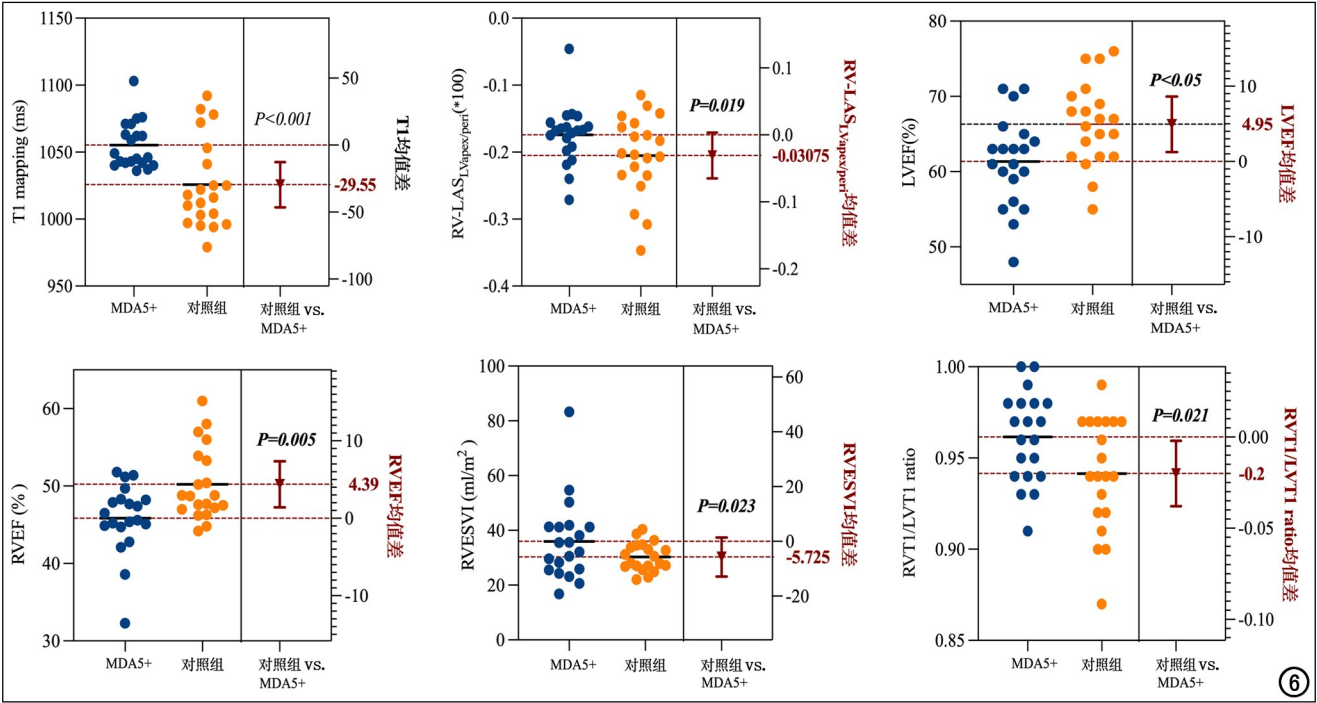


图 6 抗 MDA5 抗体阳性患者及健康对照组部分左、右心室参数 t 检验均值差。

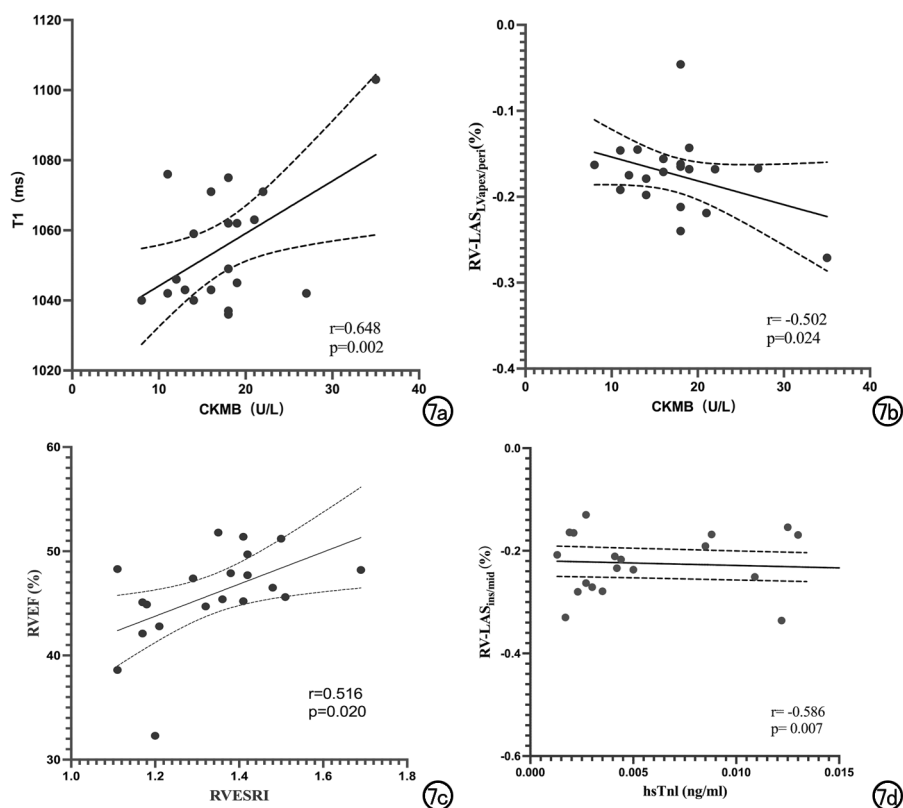


图 7 不同变量之间的 Person 相关性分析。a) 左心室心肌 T_1 -mapping 值与 CKMB 水平的相关性; b) $RV-LAS_{LVapex/peri}$ 与 CKMB 水平的相关性; c) $RVESRI$ 与 $RVEF$ 的相关性; d) $RV-LAS_{ins/mid}$ 与 $hsTnI$ 水平的相关性。

皮肤炎患者心脏受累源于长期暴露于炎症过程, 导致心脏结构和功能的改变, 受累的心脏部位包括心脏瓣膜、传导系统、心肌、心内膜、心包以及肺动脉和冠状动脉^[17]。抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者的心脏受累被认为较为少见, 大多数证据来源于个案报告和小规模队列研究。Zhou 等^[4]报告了一项中国队列研究, 使用经胸超声心动图发现抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者心脏受累的患病率为 15.8%, 这提示心肌受累可能比之前假设的更为常见。

心肌 T_1 和 T_2 -mapping 通过提供定量的 T_1 和 T_2 值, 已广泛应用于诊断弥漫性心肌异常^[18]。 T_1 值在水肿、瘢痕或纤维化受累的区域会升高^[19]。近年来, T_1 -mapping 技术在风湿性疾病中逐渐被用于检测心肌受累, 临床越来越重视管理患者的心脏并发症。早期临床干预能够减少心肌炎症或弥漫性间质纤维化导致的不可逆心肌损害风险^[20]。在本研究抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者中, 左心室心肌平均 T_1 值和各节段 T_1 值均高于健康对照组, 表明 T_1 -mapping 可能是评估这些患者心肌受累的敏感影像学标志物。

T_2 -mapping 对于检测急性水肿更具特异性, 已广泛应用于急性心肌梗死、心肌炎和肉状瘤等疾病的研究^[21]。此外, T_2 -mapping 也已被用于风湿性疾病的

研究, 如系统性硬化症, 显著提高了检测心肌受累的敏感性^[22]。在本研究中, 抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者的左心室心肌平均 T_2 值和各节段 T_2 值显著高于健康对照组, 提示可能存在心肌水肿。

右心室功能障碍是系统性自身免疫性疾病中一个被低估但显著影响预后的因素, 包括抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者。本研究表明, 与健康对照组相比, 抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者的 $RVEF$ 显著降低, 右心室收缩末期体积指数 ($RVESVI$) 显著增加, 提示其收缩功能受损。这些发现与以往的研究一致, 有研究提示系统性硬化症患者右心室功能障碍^[10, 23]。据我们所知, 这是首次研究展示抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者右心室重构指数 ($RVES-RI$) 的变化, 且右心室收缩末期容积指数 ($RVESVI$) 在该人群中显著增加。与其他重塑指标 (如右心室球形度) 相比, $RVESRI$ 在成人肺动脉高压中已被证明能更好地

预测预后, 具有简便性和可重复性^[24]。 $RVESRI$ 不仅反映了右心室的尺寸, 还反映了纵向收缩功能, 右心室的收缩末期体积提供右心室大小和功能的信息^[25]。右心室长轴应变 ($RV-LAS$) 已被验证为多种病症中右心室收缩性能的敏感标志物, 包括 2 型糖尿病和非缺血性心肌病^[9, 13]。本研究中, 抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者 $RV-LAS$ 显著降低, 进一步支持了亚临床右心室功能障碍的存在。 $RV-LAS$ 与 $hsTnI$ 及 $CKMB$ 水平之间的显著负相关, 提示右心室功能障碍与这些患者亚临床心肌损伤之间可能存在联系。这表明, 即使没有明显右心室衰竭的情况下, 抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者的亚临床功能障碍也可以被检测到, 这对早期干预具有重要的临床意义。

系统性微血管功能障碍是多种风湿性和自身免疫性疾病的典型特征^[26], 在抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者中尤为显著^[27]。这一病理状态与类风湿性肺间质病 (RP-ILD) 密切相关, 后者可导致呼吸衰竭。RP-ILD 是抗 MDA5 抗体阳性皮肤炎患者的标志性病变^[28], 且对肺循环造成显著的血流动力学压力。肺血管阻力的慢性升高导致右心室负荷增加, 进而启动了补偿性重塑和肥厚^[29]。随着时间推移, 这一适应性反

应会转变为不适应性改变,包括心肌纤维化和收缩功能障碍,正如 RV-LAS 和 RVEF 的减少所反映的那样。这可能导致心肌氧气输送受限,增加缺血性损伤的易感性。慢性低氧可激活炎症级联反应,进一步导致心肌细胞丧失和纤维化重塑。

上述发现不仅进一步验证了抗 MDA5 抗体阳性皮损患者可能存在右心室功能受损的风险,也为今后该类患者的临床管理提供了新的参考依据。

然而,本研究仍存在一定的局限性。首先,本研究样本量较小,且仅为单中心研究,未来应在更大样本量和多中心的背景下进一步验证该结果。其次,本研究仅关注了静态心脏影像学参数,尚未对患者的心脏病理特征进行深入分析,未来研究可以结合组织学检查进一步探讨心肌炎症和纤维化的具体机制。应变技术在评估心脏功能方面起到重要作用,特别是在早期心脏功能受损的检测中,在未来的研究中笔者会将应变技术应用于评估左心室早期功能损害,以进一步丰富和完善研究结果。

综上所述,CMR 技术在抗 MDA5 抗体阳性皮损患者的评估中具有重要应用价值,可考虑作为早期诊断和监测心脏损害的有力工具。未来的研究可以继续探索右心室功能障碍与临床预后的关系,并进一步评估不同治疗策略对心脏功能恢复的影响。

参考文献:

- [1] Zhang L, Wang GC, Ma L, et al. Cardiac involvement in adult polymyositis or dermatomyositis: A systematic review[J]. Clin Cardiol, 2012, 35(11): 686-691.
- [2] Diederichsen LP, Simonsen JA, Diederichsen AC, et al. Cardiac abnormalities in adult patients with polymyositis or dermatomyositis as assessed by noninvasive modalities [J]. Arthritis Care Res (Hoboken), 2016, 68(7): 1012-1020.
- [3] Zhong Y, Bai W, Xie Q, et al. Cardiac function in patients with polymyositis or dermatomyositis: a three-dimensional speckle-tracking echocardiography study [J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2018, 34(5): 683-693.
- [4] Zhou S, Lai J, Wu C, et al. Myocardial involvement is not rare in anti-melanoma differentiation-associated gene 5 antibody-positive dermatomyositis/clinically amyopathic dermatomyositis: A retrospective study[J]. Front Immunol, 2022, 13: 928861.
- [5] Lundberg IE, de Visser M, Werth VP. Classification of myositis [J]. Nat Rev Rheumatol, 2018, 14(5): 269-278.
- [6] Leng S, Dong Y, Wu Y, et al. Impaired cardiovascular magnetic resonance-derived rapid semiautomated right atrial longitudinal strain is associated with decompensated hemodynamics in pulmonary arterial hypertension [J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2019, 12(5): e008582.
- [7] Ouyang R, Leng S, Sun A, et al. Detection of persistent systolic and diastolic abnormalities in asymptomatic pediatric repaired tetralogy of Fallot patients with preserved ejection fraction: A CMR feature tracking study [J]. Eur Radiol, 2021, 31(8): 6156-6168.
- [8] Cadour F, Quemeneur M, Biere L, et al. Prognostic value of cardiovascular magnetic resonance T₁ mapping and extracellular volume fraction in nonischemic dilated cardiomyopathy [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2023, 25(1): 7.
- [9] Arenja N, et al. Right ventricular long axis strain-validation of a novel parameter in non-ischemic dilated cardiomyopathy using standard cardiac magnetic resonance imaging [J]. Eur J Radiol, 2016, 85(7): 1322-1328.
- [10] Shang Y, Zhang Y, Leng W, et al. Assessment of right ventricular function using cardiovascular magnetic resonance in patients with type 2 diabetes mellitus [J]. Quant Imaging Med Surg, 2022, 12(2): 1539-1548.
- [11] Zhang L, Dai J, Zhang P, et al. Right ventricular end-systolic remodeling index on cardiac magnetic resonance imaging: comparison with other functional markers in patients with chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. Quant Imaging Med Surg, 2022, 12(2): 894-905.
- [12] Emrich T, Bordonaro V, Schoepf UJ, et al. Right/left ventricular blood pool T₂ ratio as an innovative cardiac MRI screening tool for the identification of left-to-right shunts in patients with right ventricular disease [J]. J Magn Reson Imaging, 2022, 55(5): 1452-1458.
- [13] Deng M, Liu A, Xu W, et al. Right and left ventricular blood pool T₂ ratio on cardiac magnetic resonance imaging correlates with hemodynamics in patients with pulmonary hypertension [J]. Insights Imaging, 2023, 14(1): 66.
- [14] Mammen AL, Allenbach Y, Stenzel W, et al. 239th ENMC International Workshop: Classification of dermatomyositis, Amsterdam, the Netherlands, 14 ~ 16 December 2018 [J]. Neuromuscul Disord, 2020, 30(1): 70-92.
- [15] Bhattarai S, Chhabra L, Hashmi MF, et al. Anteroseptal myocardial infarction [M/OL]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025(2023-06-05) [2025-02-27]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK540996/>.
- [16] Koo TK, Li MY. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research [J]. J Chiropr Med, 2016, 15(2): 155-163.
- [17] Liu XH, Feng XJ, Shi JY, et al. The quest for diagnostic approaches of cardiac involvement in polymyositis and dermatomyositis [J]. Ann Palliat Med, 2020, 9(4): 2256-2270.
- [18] 钱宇彤, 柯乃钰, 庞晓宇, 等. 心脏磁共振在尿毒症性心脏病中的应用 [J]. 放射学实践, 2023, 38(10): 1333-1337.
- [19] Li S, Duan X, Feng G, et al. Multiparametric cardiovascular magnetic resonance in acute myocarditis: Comparison of 2009 and 2018 Lake Louise Criteria with endomyocardial biopsy confirmation [J]. Front Cardiovasc Med, 2021, 8: 739892.
- [20] Touma Z, Arayssi T, Kibbi L, et al. Successful treatment of cardiac involvement in dermatomyositis with rituximab [J]. Joint Bone Spine, 2008, 75(3): 334-337.
- [21] Messroghli DR, Moon JC, Ferreira VM, et al. Clinical recommendations for cardiovascular magnetic resonance mapping of T₁, T₂, T₂* and extracellular volume: A consensus statement by the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) endorsed by the European Association for Cardiovascular Imaging (EACVI) [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2017, 19(1): 75.

- [22] De Luca G, Palmisano A, Campochiaro C, et al. Cardiac magnetic resonance in systemic sclerosis myocarditis: the value of T₂-mapping to detect myocardial inflammation [J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2022, 61(11): 4409-4419.
- [23] Knight DS, Virsinskaite R, Karia N, et al. Native myocardial T₁ and right ventricular size by CMR predict outcome in systemic sclerosis-associated pulmonary hypertension [J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2024, 63(10): 2678-2683.
- [24] Amsallem M, Sweatt AJ, Aymami MC, et al. Right heart end-systolic remodeling index strongly predicts outcomes in pulmonary arterial hypertension: comparison with validated models [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(6): e005771.
- [25] Koestenberger M, Avian A, Chouvarine P, et al. Right ventricular end-systolic remodeling index in the assessment of pediatric pulmonary arterial hypertension. The European Pediatric Pulmonary Vascular Disease Network (EPPVDN) [J]. *Pediatr Res*, 2020, 88(2): 285-292.
- [26] Ida T, Furuta S, Fujiwara M, et al. Short-term and long-term outcomes of patients with anti-melanoma differentiation-associated gene 5 antibody-positive dermatomyositis [J]. *Rheumatology (Oxford)*, 2025, 64(2): 756-762.
- [27] Zanatta E, Colombo C, D'Amico G, et al. Inflammation and coronary microvascular dysfunction in autoimmune rheumatic diseases [J]. *Int J Mol Sci*, 2019, 20(22): 5563.
- [28] 徐光兴, 俞咏梅, 徐亮, 等. 皮肌炎/多发性肌炎并发间质性肺病的 CT 定量分析与肺功能的相关性研究 [J]. *放射学实践*, 2023, 38(5): 565-570.
- [29] Jablonski R, Borade S, Strek ME, et al. Recognition and management of myositis-associated rapidly progressive interstitial lung disease [J]. *Chest*, 2020, 158(1): 252-263.

(收稿日期: 2025-02-27 修回日期: 2025-06-30)

《放射学实践》杂志微信公众平台开通啦!

遵照同行评议、价值导向、等效应用原则,国内各大学会、协会、组织机构通过科技工作者推荐、专家评议、结果公示等规定程序,《放射学实践》杂志入选中国科协发布 10 大领域《我国高质量科技期刊分级目录》业内认可的较高水平期刊。《放射学实践》杂志入选 2023 年版北京大学和北京高校图书馆期刊工作研究会共同主持的国家社会科学基金项目“学术期刊评价及文献计量学研究”研究成果——《中国核心期刊要目总览》。

《放射学实践》杂志微信公众平台立足于准确地传递医学影像领域的最新信息,致力于为关注医学影像领域的广大人士服务。欢迎大家通过微信平台,以文字、图片、音频和视频等形式与我们互动,分享交流最新的医学影像资讯。您还可以通过微信平台免费阅读及搜索本刊所有发表过的论文,投稿作者可以查询稿件状态等。

您可以通过以下方式关注《放射学实践》杂志微信公众平台:

1. 打开微信,通过“添加朋友”,在搜索栏里直接输入“放射学实践”进行搜索。
2. 在“查找微信公众号”栏里输入“放射学实践”即可找到微信公众号,点击“关注”,添加到通讯录。
3. 打开微信,点击“扫一扫”,手机镜头对准下面的二维码,扫出后点击关注即可。



关注有惊喜!

· 心血管影像学专题 ·

全自由呼吸心脏磁共振检查之左、右心功能成像及分析

刘乐乐,尹刚,蒋梦迪,韩紫娟,安靖,王开福,王伟,葛英辉,刘婷,陆敏杰

【摘要】 目的:探讨全自由呼吸下(FB)压缩感知(CS)实时采集与回顾性运动校正(MoCo)技术结合的电影序列在左、右心室功能成像及分析中的可行性,并与常规心脏磁共振(CMR)回顾性心电门控K空间分段(Seg)填充采集的屏气(BH)电影序列进行对比。**方法:**前瞻性纳入47例心脏病患者,采用3.0T MR扫描仪,分别获得FB和BH电影图像。使用Likert 5分量表评估两种电影序列的图像质量(IQ)及测量左、右心室功能参数包括舒张末期容积(EDV)、收缩末期容积(ESV)、每搏输出量(SV)、射血分数(EF)、心排量(CO)及心肌质量(Mass)。**结果:**FB和BH序列的图像质量评分分别为 3.83 ± 0.73 和 3.98 ± 0.82 ($Z = -1.313, P = 0.189$)。FB和BH序列的平均扫描时间分别为 (150.43 ± 28.27) s和 (397.92 ± 42.64) s ($Z = -5.978, P < 0.001$)。两种技术在评估双心室容积各种参数时差异无统计学意义(均 $P > 0.05$)。Bland-Altman分析显示了良好的一致性。**结论:**自由呼吸运动校正的心脏电影MRI结合压缩感知技术与常规屏气电影序列相比,图像质量相近,左右心室收缩功能评价一致性好,且显著缩短了扫描时间,明显提高了临床扫描效率。

【关键词】 心脏磁共振成像;电影序列;压缩感知;自由呼吸;运动校正

【中图分类号】 R445.2;R541 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2025)11-1383-07

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2025.11.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Left and right ventricular functional imaging and analysis using fully free-breathing cardiac magnetic resonance LIU Le-le, YIN Gang, JIANG Meng-di, et al. Department of MRI, Fuwai Hospital, National Center for Cardiovascular Diseases of China, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China

【Abstract】 Objective: To investigate the feasibility of cine sequences combining free-breathing (FB) compressed sensing (CS) real-time acquisition with retrospective motion correction (MoCo) technology in left and right ventricular systolic function imaging and analysis, and compare them with breath-hold (BH) cine sequences acquired by conventional cardiac magnetic resonance (CMR) retrospective electrocardiographic gating K-space segmental (Seg) filling. **Methods:** Forty-seven patients with heart disease were prospectively enrolled for imaging on a 3.0T MR scanner. Both FB and BH cine images were acquired. The image quality (IQ) of the two sequences was assessed using a Likert 5-point scale. Left and right ventricular function parameters, including end-diastolic volume (EDV), end-systolic volume (ESV), stroke volume (SV), ejection fraction (EF), cardiac output (CO), and myocardial mass (Mass), were measured. **Results:** The image quality scores of FB and BH sequences were 3.83 ± 0.73 and 3.98 ± 0.82 , respectively ($Z = -1.313, P = 0.189$). The average scanning times for FB and BH sequences were (150.43 ± 28.27) seconds and (397.92 ± 42.64) seconds, respectively ($Z = -5.978, P < 0.001$). There were no significant differences between the two techniques in the assessment of biventricular volumetric parameters (all $P > 0.05$). Bland-Altman analysis demonstrated good consistency. **Conclusion:** Free-breathing motion-corrected cardiac cine MRI combined with compressed sensing technology provides comparable image quality and consistent evaluation of left and right ventricular systol-

作者单位:100037 北京,中国医学科学院北京协和医学院国家心血管病中心阜外医院磁共振影像科(刘乐乐、尹刚、蒋梦迪、韩紫娟、陆敏杰);518057 深圳,西门子(深圳)磁共振有限公司(安靖);525000 广东茂名,广州中医药大学茂名医院(王开福);528244 广东佛山,南方医科大学第七附属医院医学影像科(王伟);450003 郑州,华中阜外医院(葛英辉);110001 沈阳,中国医科大学附属第一医院(刘婷)

作者简介:刘乐乐(1996-),女,山东人住院医师,主要从事心脏磁共振新技术研究。

通讯作者:陆敏杰, E-mail: coolkan@163.com

基金项目:国家自然科学基金(82471973);北京市自然科学基金(7242110)

ic function compared with conventional breath-hold cine sequences. Additionally, it significantly reduces scanning time and improves clinical scanning efficiency.

【Key words】 Cardiac magnetic resonance imaging; Cine sequences; Compressed sensing; Free breathing; Motion correction

心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)成像作为一种无创影像学方法,能够精准评估心脏的结构及功能^[1,2],为心脏疾病的诊断提供重要支持^[3]。平衡稳态自由进动(balanced steady-state free precession, bSSFP)电影序列因其高空间分辨率、广泛视野、无死角和可重复性高等特点^[4,5],已成为双心室功能评估的标准方法。传统的回顾性心电门控 K 空间分段(segment, Seg)填充采集的屏气(breath hold, BH)电影序列需要结合心电门控,在若干个心动周期的同一时相采集磁共振信号(即分段采集),以重建出 MR 图像^[6]。然而,为了保证足够的时间空间分辨率与全方位、多角度地呈现心脏结构和功能,通常要求患者在采集过程中多次屏气,每次持续数秒^[7]。这对于心力衰竭患者、呼吸困难者或婴幼儿等特殊人群而言极具挑战性。不当的呼吸控制容易导致运动伪影,降低图像质量,影响诊断的准确性^[8,9]。

为克服这些局限,近年来,全自由呼吸(full free breathing, FB)结合压缩感知(compressed sensing, CS)和运动校正(motion correction, MoCo)的实时电影成像技术(real-time compressed sensing cine with motion correction, RTCSCineMoCo)引起了广泛关注^[10]。CS 技术利用信号的稀疏性,通过随机采样的方式获取少量数据,借助特定的重建算法,精准地重建出原始信号^[11]。MoCo 技术通过实时跟踪和补偿患者的呼吸运动,确保成像过程中图像的准确性和一致性^[12]。然而,这一新技术的临床应用价值仍需进一步验证。本研究旨在从心功能测量、扫描效率和患者体验等多个维度评估全自由呼吸下 RTCSCineMoCo 技术的可行性,探讨其在常规心脏 MRI 检查中的临床应用前景^[13,14]。

材料与方法

1.一般资料

前瞻性随机纳入 2023 年 9 月—2024 年 4 月在本院接受心脏磁共振成像(MRI)检查的 47 例患者。排除标准:①存在任何磁共振检查禁忌症,如植入非磁共振兼容的心脏起搏器、人工瓣膜、人工耳蜗或其他电子植入设备,以及患有严重幽闭恐惧症;②未能配合完成或无法耐受磁共振检查。本研究方案经本院伦理委员会审批通过,所有患者均签署知情同意书。

2.图像采集

所有 CMR 检查均采用 3.0T 磁共振扫描仪(MAGNETOM Vida, Siemens Healthcare, Erlangen, Germany)及 18 通道相控阵体线圈,配合心电门控技术。检查流程严格遵循标准化方案:首先获取心脏的基础定位像;然后扫描基础解剖成像和心脏定位像;最后完成屏气(BH)和自由呼吸(FB)两种方式的电影扫描,包括二腔心(2CH)、四腔心(4CH)、左室流出道(LVOT)、左室流出道斜冠位和短轴位(SA)。RTC-SCineMoCo 技术采用心电图(ECG)门控实时采集心脏动态影像,通过压缩感知技术实现多心跳-呼吸周期覆盖;通过调整 K 空间数据,统一每个心跳的时相数,重建动态影像;根据运动伪影和心律失常评分筛选质量较高的心跳周期子集,经非刚性配准与多周期平均处理实现噪声抑制与图像质量提升。完整技术流程见图 1,图像扫描流程见图 2,与传统 BH 序列的扫描参数对比见表 1。

表 1 BH 序列和 FB 序列扫描参数

参数	BH 序列	FB 序列
心电门控	回顾性	适应性
TR/ms	3.33	3.33
TE/ms	1.46	1.46
FOV/mm ²	380×333	380×333
矩阵	206×256	200×240
层厚/mm	8	8
FA/°	58~80	60
带宽/Hz/pixel	977	947
时间分辨率/ms	40	22~50
空间分辨率/mm×mm	1.5×1.5	1.6×1.6
加速因子	GRAPPA 3	CS 14.3

注:TR 为重复时间,TE 为回波时间,FA 为翻转角。

3.图像质量评价

由两名具有丰富经验的心血管影像专家采用 Likert 五分量表^[15,16]独立评估所有电影图像质量。评分标准:5 分,图像质量优异,解剖结构完整清晰,无伪影;4 分,图像质量良好,主要解剖结构清晰,伪影轻微;3 分,图像质量一般,重要解剖结构清晰,伪影对诊断影响小;2 分,图像质量差,结构不清晰,伪影影响诊断;1 分,图像质量极差,结构难以辨认,伪影严重影响诊断。

4.心功能定量评估

采用 CVI 42 后处理软件(Circle Cardiovascular Imaging, Calgary, Canada)进行心功能定量分析。首先利用 AI 自动识别双心室舒张末期与收缩末期轮廓,并依据以下解剖学标准进行人工校正:①参照长轴

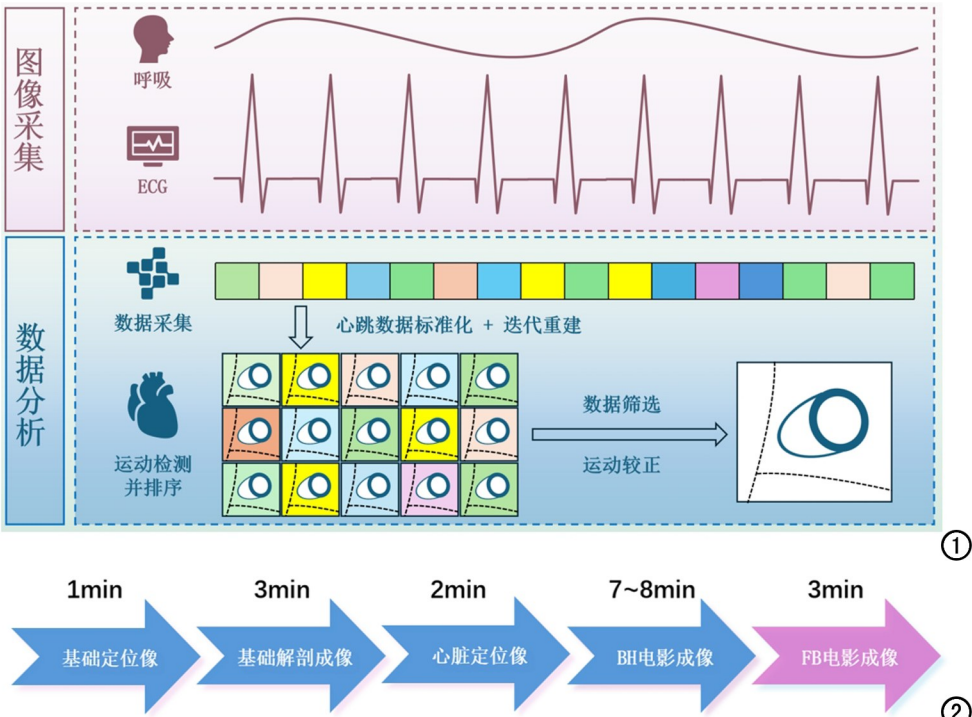


图 1 RTCSCineMoCo 技术的采集和重建工作流程示意图。

图 2 图像扫描流程示意图。

位确定基底层房室瓣环平面位置,结合心房与心室动态变化;②左心室测量范围包括从流出道至主动脉瓣平面,且基底段心肌环绕度超过 50%的区域;③右心室测量范围涵盖从流出道至肺动脉瓣平面;④乳头肌和心室肌小梁计入心室腔容积。基于校正后的轮廓,应用 Simpson 法计算左、右心室功能参数,包括舒张末期容积(end-diastolic volume,EDV)、收缩末期容积(end-systolic volume,ESV)、每搏输出量(stroke volume,SV)、心排血量(cardiac output,CO)和射血分数(ejection fraction,EF)。左心室心肌质量(Mass)通过心内膜与心外膜间的容积与心肌密度(1.05 g/cm³)的

乘积获得^[17]。

为评估方法可重复性,随机选取 20 例患者的 FB 电影序列,由另一操作者独立测量双心室功能参数,并在 1 个月后进行重复测量。

5.统计学分析

采用 SPSS 27.0 和 MedCalc 23.0 软件进行统计分析。计量资料用以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示。Shapiro-Wilk 正态性检验显示,两组图像的扫描时间、图像质量评分及心功能参数符合正态性分布,采用配对样本 *t* 检验。通过线性回归分析和 Bland-Altman 分析评估两种技术之间定量指标的相关性和一致性。观察者间和观察者内的一致性采用组内相关系数(interclass correlation

结 果

1.一般资料

本研究最终纳入 47 例患者,包括男性 25 例,女性 22 例,年龄 15~69 岁,平均年龄(42±15.6)岁;心率(70±14)/min;体表面积(1.8±0.18)m²。疾病类型包括肥厚型心肌病 13 例,扩张型心肌病 7 例,心肌炎 6 例,冠心病 6 例,先天性心脏病 6 例,心力衰竭 5 例,高血压 4 例。所有患者均成功完成两种心脏电影成像检查。

2.图像质量

FB 序列和 BH 序列的主观图像质量评分分别为(3.83±0.73)和(3.98±0.82),两者差异无统计学意义($Z = -1.313, P = 0.189$)。FB 序列中 5 分 7 例,4 分 27 例,3 分 11 例,2 分 2 例,1 分 0 例;BH 序列

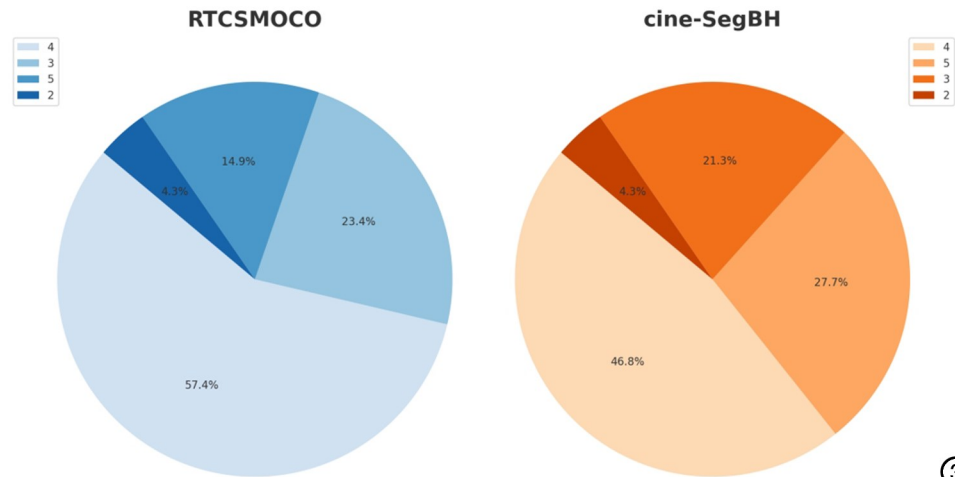


图 3 FB 序列和 BH 序列图像质量评分占比情况。

表 2 BH 序列和 FB 序列的定量参数差异

定量参数	BH(n=47)	FB(n=47)	r	P
LVEF/%	53.42±15.31	53.02±15.15	0.989	0.221
LVEDV/mL	161.17±55.47	162.1±56.13	0.995	0.252
LVESV/mL	81.11±55.50	82.21±55.18	0.997	0.089
LVSV/mL	80.06±21.74	79.90 ±22.18	0.978	0.812
LVCO/L	5.54±1.76	5.52±1.79	0.981	0.825
LVmass/g	112.69±45.78	114.11±47.59	0.993	0.094
RVEF/%	55.53±11.51	54.55±11.20	0.945	0.177
RVEDV/mL	129.95±39.57	130.40±40.50	0.983	0.686
RVESV/mL	59.25±26.28	60.79±27.03	0.973	0.096
RVSV/mL	70.70±22.98	69.60±22.63	0.970	0.188
RVCO/L	4.88±1.77	4.81±1.70	0.973	0.216
Scan Time/s	397.92±42.64	150.43±28.27	0.717	<0.001

中 5 分 13 例,4 分 22 例,3 分 10 例,2 分 2 例,1 分 0 例(图 3、4)。

3.检查时间

FB 序列平均扫描时间为(150.43±28.27)s,低于 BH 序列的(397.92±42.6)s,差异有统计学意义($P<0.001$,表 2)。

4.双心室功能参数

双心室 EF、EDV、ESV、SV、CO 及左心室 Mass 等参数在 FB 序列和 BH 序列间差异均无统计学意义(P 均 >0.05 ,表 2)。Bland-Altman 分析结果显示,两种技术的双心室功能参数数据点主要分布在 95%一致性界限内,一致性较好(图 5)。同时,相关性分析结果显示,通过两种技术测得的双心室 EF 和 EDV 具有显著相关性(r 均 ≥ 0.95 , P 均 <0.001 ,图 6)。

5.可重复性分析

左心室参数(LVEF、LVEDV、LVESV 等)和右心室参数(RVEF、RVEDV、RVESV 等)的观察者间和观察者内 ICC 均 ≥ 0.938 ,这表明 FB 序列在心室功能评估中具有高度可靠性和可重复性(表 3)。

表 3 FB 序列定量参数的测量重复性分析

定量参数	组间一致性	组内一致性
LVEF	0.999*	0.971*
LVEDV	0.999*	0.999*
LVESV	0.999*	0.999*
LVSV	0.999*	0.998*
LVCO	0.999*	0.998*
LVmass	0.993*	0.995*
RVEF	0.938*	0.994*
RVEDV	0.986*	0.998*
RVESV	0.992*	0.997*
RVSV	0.950*	0.998*
RVCO	0.959*	0.998*

注: * $P<0.05$

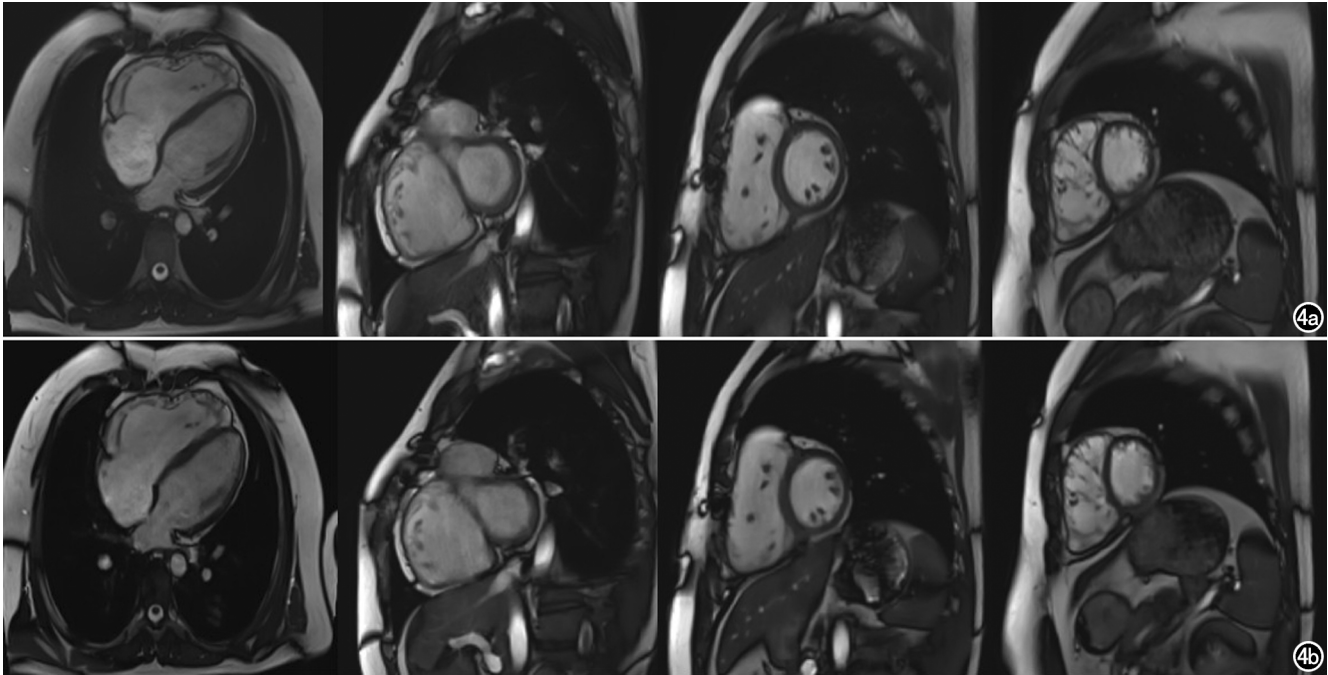


图 4 男,27 岁,法洛四联症,患者术后心脏舒张末期四腔心和短轴电影图像,心率 78 次/分。a)BH 电影图像,扫描时间 131 秒,图像质量评分 5 分;b)FB 电影图像,扫描时间 55 秒,图像质量评分 5 分。

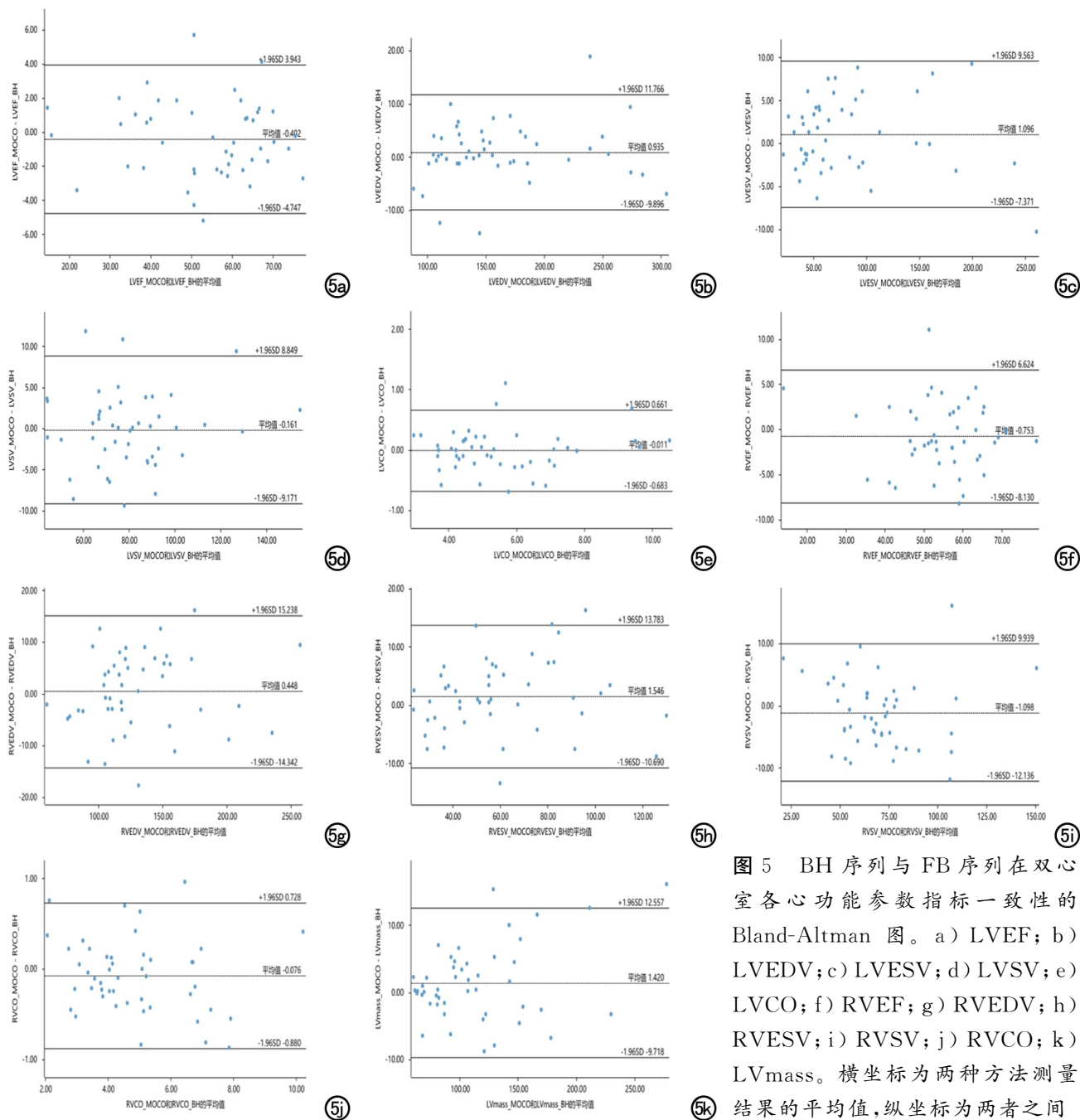


图 5 BH 序列与 FB 序列在双心室各心功能参数指标一致性的 Bland-Altman 图。a) LVEF; b) LVEDV; c) LVESV; d) LVSV; e) LVCO; f) RVEF; g) RVEDV; h) RVESV; i) RVSV; j) RVCO; k) LVmass。横坐标为两种方法测量结果的平均值,纵坐标为两者之间的

的差值;虚线为差值的平均值,实线表示 95%一致性界限(即 ± 1.96 个标准差)。

讨 论

作为全自由呼吸心脏磁共振检查的关键组成部分,本研究表明,结合压缩感知与运动校正技术的自由呼吸左右心室电影成像及功能分析,与传统屏气序列具有高度一致性,并显著缩短了扫描时间。这一结果为全自由呼吸心脏 MRI 的临床应用奠定了坚实的基础。

作为无创评价心室形态与功能的“金标准”,CMR 电影成像对快速且准确的成像方法提出了迫切需求^[18]。近年来,压缩感知技术在心脏 MR 中的应用显

著提高了成像效率^[19]。先前研究表明,与传统技术相比,压缩感知可以使屏气次数减少 50%,总扫描时间减少 43%,而定量参数的测量没有显著差异^[20]。此外,结合压缩感知与实时成像技术的电影序列,可有效降低房颤等心律不齐患者的图像伪影,并提升图像质量^[21]。有研究证明,结合自由呼吸模式的单次激发压缩感知技术能够在缩短扫描时间的同时保持较高的图像质量^[22]。在此基础上,RTCSCineMoCo 技术结合实时采集、压缩感知和回顾性非刚性运动校正技术,不仅缩短了扫描时间,还实现了与传统屏气序列相当的图像质量和心功能参数,这与以往研究结果一致^[10,23-25]。

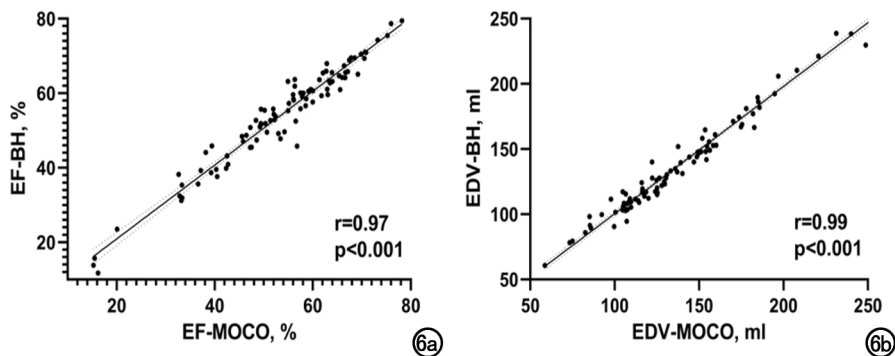


图 6 两种技术测量双心室定量参数的相关性曲线。a)EF;b)EDV。

相较于 Chang 等^[26]提出的基于深度学习的刚性运动校正技术,RTCSCineMoCo 技术的优势在于无需大量训练数据,具备更高的实用性。尽管深度学习技术在运动校正领域展现了巨大的潜力,但其对计算资源和训练数据的需求在临床应用中仍存在一定限制^[27]。相比之下,本研究提出的压缩感知结合运动校正的电影成像技术,能够直接解决自由呼吸状态下的运动伪影问题,并以更高效且简便的方式实现心脏功能的精准评估。

然而,本研究存在一定局限性。首先,样本量较小且为单中心研究,未来应扩大样本量并进行多中心验证。此外,尽管 FB 序列显著缩短了扫描时间,但图像重建过程仍较为耗时,需要较高的软硬件配置。因此,优化图像重建算法以缩短后处理时间将成为未来研究的重点方向。FB 序列的应用目前主要集中于功能性参数的评估,未来可探索其在更复杂场景中的应用。例如,结合心肌组织特征成像(如 T_1/T_2 -mapping)或扩散张量成像,以拓展其在心肌病理研究中的应用潜力。

本研究表明,基于压缩感知与运动校正技术的自由呼吸心脏磁共振电影成像能够显著缩短扫描时间,同时保持与传统屏气序列相当的图像质量和左右心功能参数,具有较高的可重复性和广泛的临床应用前景。

参考文献:

[1] Pan JA, Kramer CM. Cardiac magnetic resonance imaging in heart failure[J]. *Cardiovasc Innov Appl*, 2024, 9: 944.
[2] Beer M, Schönnagel B, Herrmann J, et al. Non-invasive pediatric cardiac imaging—current status and further perspectives[J]. *Mol Cell Pediatr*, 2022, 9(1): 21.
[3] Rajiah PS, François CJ, Leiner T. Cardiac MRI: state of the art[J]. *Radiology*, 2023, 307(3): e223008.
[4] Wang J, Li X, Lin L, et al. Diagnostic efficacy of 2-shot compressed sensing cine sequence cardiovascular magnetic resonance imaging for left ventricular function[J]. *Cardiovasc Diagn Ther*, 2020, 10(3): 43141-43441.
[5] Ferreira PF, Gatehouse PD, Mohiaddin RH, et al. Cardiovascular

magnetic resonance artefacts[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15(1): 41.
[6] Lopez D, Salerno M. Basic principles of cardiovascular MRI: physics and imaging technique [M/OL]. Cham: Springer International Publishing, 2015: 131-143 [2024-08-15]. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22141-0_9.
[7] 尹刚, 陈秀玉, 崔辰, 等. 心脏磁共振单次屏气三维容积电影成像在心脏功能评价中的应用[J]. *放射学实践*, 2018, 33(2): 156-160.
[8] Aggarwal R, Singla G, Singh H, et al. Myocardial viability imaging using a novel non-breath-hold cardiac MRI protocol: A comparative assessment with ^{18}F -FDG PET[J]. *Egypt J Radiol Nucl Med*, 2020, 51(1): 177.
[9] Zucker EJ, Sandino CM, Kino A, et al. Free-breathing accelerated cardiac MRI using deep learning: validation in children and young adults[J]. *Radiology*, 2021, 300(3): 539-548.
[10] Longère B, Abassebay N, Gkizas C, et al. A new compressed sensing cine cardiac MRI sequence with free-breathing real-time acquisition and fully automated motion-correction: A comprehensive evaluation[J]. *Diagn Interv Imaging*, 2023, 104(11): 538-546.
[11] Hema M, Gurunadha R, Suman JV, et al. Effective image reconstruction using various compressed sensing techniques[C/OL]. International Conference on Advances in Modern Age Technologies for Health and Engineering Science (AMATHE), 2024: 1-6 [2025-01-09]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10582191>.
[12] Bush MA, Ahmad R, Jin N, et al. Patient specific prospective respiratory motion correction for efficient, free-breathing cardiovascular MRI[J]. *Magn Reson Med*, 2019, 81(6): 3662-3674.
[13] Oca Pernas R, Hormaza Aguirre N, Capelastegui Alber A, et al. Fast cardiac magnetic resonance protocol. Feasibility of accelerated compressed sensing cine sequences in clinical practice[J]. *Radiologia (Engl Ed)*, 2025, 67(2): 137-146.
[14] 杨凯, 尹刚, 安靖, 等. 全自由呼吸心脏 MR 检查: 初步临床应用[J]. *中国医学影像技术*, 2024, 40(8): 1183-1188.
[15] 林青, 王佳佳, 孙明华, 等. 心脏磁共振压缩感知电影序列的临床应用[J]. *中国医学影像技术*, 2020, 36(2): 281-286.
[16] Klinkle V, Muzzarelli S, Lauriers N, et al. Quality assessment of cardiovascular magnetic resonance in the setting of the European CMR registry: description and validation of standardized criteria[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15(1): 55.
[17] Winther HB, Hundt C, Schmidt B, et al. v-net: deep learning for generalized biventricular mass and function parameters using multicenter cardiac MRI data[J]. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 2018, 11(7): 1036-1038.
[18] 李颜玉, 林路, 王健, 等. 压缩感知实时成像结合回顾性运动校正心脏磁共振电影序列对评估肺动脉高压患者右室功能及应变的应用价值[J]. *磁共振成像*, 2022, 13(10): 114-120.
[19] 张前, 姜兴岳. 压缩感知技术在磁共振血管成像中的研究进展[J]. *放射学实践*, 2025, 40(4): 549-553.
[20] Naresh NK, Malone L, Fujiwara T, et al. Use of compressed sens-

- ing to reduce scan time and breath-holding for cardiac cine balanced steady-state free precession magnetic resonance imaging in children and young adults[J]. *Pediatr Radiol*, 2021, 51(7): 1192-1201.
- [21] Allen BD, Carr ML, Markl M, et al. Accelerated real-time cardiac MRI using iterative sparse SENSE reconstruction: comparing performance in patients with sinus rhythm and atrial fibrillation [J]. *Eur Radiol*, 2018, 28(7): 3088-3096.
- [22] 尹刚, 董文浩, 陈秀玉, 等. 心脏 MR 压缩感知超快速电影序列评价左右心室收缩功能的应用价值[J]. *中华放射学杂志*, 2023, 57(3): 300-305.
- [23] Takakado M, Kido T, Ogawa R, et al. Free-breathing cardiovascular cine magnetic resonance imaging using compressed-sensing and retrospective motion correction: Accurate assessment of biventricular volume at 3T[J]. *Jpn Journal of Radiology*, 2023, 41(2): 142-152.
- [24] Li Y, Lin L, Wang J, et al. Cardiac cine with compressed sensing real-time imaging and retrospective motion correction for free-breathing assessment of left ventricular function and strain in clinical practice[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(4): 2262-2277.
- [25] Pang J, Leon PI, Bi X, et al. Free-breathing cardiac cine MRI with compressed sensing real-time imaging and respiratory motion correction: Initial pediatric experience [C/OL]. Joint Annual Meeting ISMRM-ESMRMB ISMRT 31st Annual Meeting. London, England, UK, 2024: 0024 [2024-08-19]. <https://archive.ismrm.org/2022/0024.html>.
- [26] Chang Y, Li Z, Saju G, et al. Deep learning-based rigid motion correction for magnetic resonance imaging: a survey[J]. *Meta-Radiology*, 2023, 1(1): 100001.
- [27] Hewlett M, Petrov I, Johnson PM, et al. Deep-learning-based motion correction using multichannel MRI data: A study using simulated artifacts in the fastMRI dataset[J]. *NMR Biomed*, 2024, 37(10): e5179.
- (收稿日期: 2025-02-12 修回日期: 2025-05-15)

本刊网站及远程稿件处理系统投入使用

本刊网站与远程稿件处理系统已开发测试完毕,已于 2008 年 3 月 1 号正式开通投入使用。

作者进行网上投稿及查稿具体步骤如下:请登录《放射学实践》网站(<http://www.fsxsj.net>)点击进入首页 → 点击“作者投稿” → 按提示注册(请务必按系统提示正确填写个人信息,同时记住用户名和密码,以便查询稿件处理进度) → 用新注册的用户名和密码登录 → 点击“作者投稿”进入稿件管理页面 → 点击“我要投稿” → 浏览文件 → 上传文件(浏览文件后请点击后面的“上传”按钮,只有系统提示“稿件上传成功”方可进行下一步录入操作,文章须以 WORD 格式上传,图表粘贴在文章中) → 录入稿件标题、关键词等 → 最后点击“确定”即可完成投稿。投稿后请速寄审稿费(100 元/篇)以使稿件迅速进入审稿处理。

作者自投稿之日起可不定期登录本刊网站查看稿件处理进度,不必打电话或发邮件查询,具体步骤如下:用注册过的用户名和密码登录 → 点击“作者查稿”进入稿件管理页面 → 点击左侧导航栏“我的稿件库” → “稿件状态”显示稿件处理进度 → 点击“查看” → 选择“当前信息”或“全部信息”查看稿件处理过程中的具体信息。稿件退修和催审稿费(版面费)的信息作者亦可在注册时填写的邮箱中看到,作者在邮箱看到相关信息后须进入本系统进行相应处理。

作者如从邮箱和邮局投稿(或网上投稿成功后又从邮箱或邮局再次投稿),本刊须花费大量精力将稿件录入系统中,部分稿件重复多次处理,这给我们的稿件统计及处理工作带来巨大困难。本刊作者需登录本刊网站投稿,如果通过邮箱或邮局投稿,本刊会通知您通过网上投稿。

由于准备时间仓促及经验不足,网站及远程稿件处理系统必然会存在一些缺点和不足之处,希望各位影像同仁不吝赐教,多提宝贵意见,予以指正。

如果您在投稿中遇到什么问题,或者对本系统及网站有好的意见和建议,请及时联系我们。

联系人:石鹤 明桥 联系电话:027-69378385 15926283035