

磁共振特征追踪技术在急性心肌炎中的临床应用

牟俊, 刘静, 刘新峰, 王荣品, 徐超

【摘要】 目的:应用心脏磁共振特征追踪(CMR-FT)技术评价急性心肌炎(aMC)患者左心室心肌应变功能,探讨应变参数与左心室射血分数(LVEF)的相关性。**方法:**回顾性搜集 49 例 aMC 患者和 32 例健康志愿者(对照组)电影序列心脏 MRI 图像(标准两腔、三腔、四腔及短轴位),采用磁共振后处理站计算两组被试者的 LVEF,并应用 CMR-FT 技术测量左心室各项心肌应变参数值(左心室心肌整体径向应变、周向应变和纵向应变及各向应变率)并进行组间比较,采用受试者工作特征(ROC)曲线评价左心室应变参数诊断 aMC 的效能,并对 aMC 组中收缩期和舒张期各项应变参数与 LVEF 的相关性进行统计学分析。**结果:**aMC 组和对照组的心肌整体径向应变、周向应变和纵向应变值分别为 $26.07\% \pm 13.60\%$ vs. $38.95\% \pm 8.90\%$ 、 $-15.58\% \pm 5.97\%$ vs. $-20.79\% \pm 2.33\%$ 、 $-10.86\% \pm 5.25\%$ vs. $-15.22\% \pm 3.30\%$,aMC 组的左心室各项应变参数值均低于对照组,差异均具有统计学意义($P < 0.05$)。左心室周向应变和径向应变预测急性心肌炎组的敏感度分别为 77.55% 和 61.22%,特异度分别为 75.00% 和 84.38%。左心室各项应变参数与 LVEF 之间均具有相关性,其中左心室径向应变、周向应变与 LVEF 呈高度相关($r=0.809, -0.904, P$ 均 < 0.05)。**结论:**CMR-FT 技术能够定量评价急性心肌炎患者左心室心肌应变功能,为临床评估 aMC 患者的心肌损伤程度提供参考依据,其测得的心肌应变参数和 LVEF 在反映心肌收缩功能受损方面具有较好的一致性。

【关键词】 急性心肌炎; 特征追踪技术; 磁共振成像; 心肌应变; 左心室

【中图分类号】 R814.42; R734.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)08-0996-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.08.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Clinical application of magnetic resonance feature tracking technique in acute myocarditis MOU Jun, LIU Jing, LIU Xin-feng, et al. Department of Radiology, Guizhou Provincial People's Hospital, the Key Construction Discipline Of Guizhou Province (Medical Imaging), Guiyang 550002, China

【Abstract】 Objective: The purpose of this study was to evaluate the left ventricular myocardial strain in patients with acute myocarditis (aMC) by use of cardiovascular magnetic resonance feature tracking (CMR-FT) technique and to investigate the correlation between strain parameters and left ventricular ejection fraction (LVEF). **Methods:** The images of 49 patients with aMC and 32 healthy volunteers (HC group) who underwent cine magnetic resonance scan on standard two-chamber view, three-chamber view, four-chamber view and short axis view were collected retrospectively. The left ventricular ejection fraction (LVEF) were calculated on the magnetic resonance post-processing station. The left ventricular myocardial strain parameters were measured by CMR-FT, including global peak radial strain (PRS), peak circumferential strain (PCS), and peak longitudinal strain (PLS) of left ventricular myocardium and the systolic and diastolic anisotropic strain rate, and their differences between aMC group and HC group were compared statistically. The receiver operating characteristic (ROC) curve was used to evaluate the efficacy of left ventricular strain parameters in diagnosis of acute myocarditis. The correlation between each strain parameter and LVEF in aMC group were analyzed statistically. **Results:** The left ventricular strain parameters in the aMC group were lower than those in the control group. The global peak radial strain, peak circumferential strain, peak longitudinal

作者单位: 550002 贵州贵阳, 贵州省人民医院医学影像科/贵州省省级重点建设学科(医学影像学)

作者简介: 牟俊(1989-), 男, 湖北利川人, 硕士研究生, 主治医师, 主要从事心胸影像诊断工作。

通讯作者: 刘新峰, E-mail: 379771752@qq.com

基金项目: 贵州省卫健委科学技术基金项目(gzkwkj2021-373; gzkwkj2023-467); 贵州省科技成果应用及产业化计划项目(黔科合成果[2019]4445; 黔科合成果-LC[2023]022)

strain in the two groups were $26.07\% \pm 13.60\%$ vs. $38.95\% \pm 8.90\%$, $-15.58\% \pm 5.97\%$ vs. $-20.79\% \pm 2.33\%$, and $-10.86\% \pm 5.25\%$ vs. $-15.22\% \pm 3.30\%$, respectively, with statistically significant differences (all $P < 0.05$). The sensitivity and specificity of left ventricular peak circumferential strain and peak radial strain in distinguishing acute myocarditis group and control group were 77.55% and 61.22%, 75.00% and 84.38%, respectively. There were certain correlation between left ventricular strain parameters and LVEF, among which the left ventricular peak radial strain and peak circumferential strain were highly correlated with LVEF ($r = 0.809$ and -0.904 , both $P < 0.05$).

Conclusion: CMR-FT can quantitatively evaluate the left ventricular myocardial strain function in patients with acute myocarditis and provide reference for clinical evaluation of the degree of myocardial injury in patients with aMC. Myocardial strain can better reflect impaired myocardial contractile function which is the same as LVEF.

【Key words】 Acute myocarditis; Feature tracking technique; Magnetic resonance imaging; Myocardial strain; Left ventricle

急性心肌炎(acute myocarditis, aMC)是指由各种原因引起的心肌细胞及其组织间隙的急性局限性或弥漫性炎症,炎性细胞浸润和心肌水肿是其主要的病理改变^[1]。急性心肌炎临床表现多样,轻症者可有心悸、胸痛、乏力,重症者可出现晕厥、呼吸困难、甚至猝死。诊断心肌炎的金标准为心内膜活检,但其为有创检查、临床开展较困难。而心脏 MRI 是诊断心肌炎的最重要的无创性检查方法,已纳入路易斯湖诊断标准。已有多项研究证实,心脏磁共振 T_1 -mapping 和 T_2 -mapping 技术可以定量评价早期心肌纤维化和心肌水肿^[2],但对心脏功能受损程度尚不能精准评价。新近出现的心脏磁共振特征追踪(cardiovascular magnetic resonance feature tracking, CMR-FT)技术可用于评价心肌早期功能改变,尤其是在评价左心室收缩功能障碍方面具有较高价值。本研究通过应用磁共振特征追踪技术分析急性心肌炎患者左心室心肌应变能力,并探讨应变参数与左心室射血分数的相关性,旨在进一步提高对心肌炎和心功能评估的影像诊断水平。

材料与方 法

1. 临床资料

回顾性收集 2016 年 12 月—2022 年 2 月在本院经临床诊断为急性心肌炎并行心脏 MR 检查者的 70 例患者的病例资料。所有患者依据中华医学会和欧洲心脏病学会制定的诊断标准诊断为急性心肌炎^[3-4];主要临床诊断依据 ≥ 3 条,或主要临床诊断依据 2 条加次要临床诊断依据 ≥ 3 条,并除外其它疾病;主要临床诊断依据包括心脏形态及功能改变、心电图、心肌标记物及 MR 表现等。10 例因合并其它疾病被排除,11 例因图像质量不佳被排除,最终纳入 49 例 aMC 患者作为研究组。其中,男 27 例,女 22 例;年龄 8~79 岁,平均(42.33 \pm 20.49)岁。选择性别及年龄与 aMC 组

无统计学差异的 32 例健康志愿者作为对照组,男 17 例,女 15 例,年龄 9~81 岁,平均(33.66 \pm 19.58)岁。对照组入组条件为经病史、体格检查、心电图和超声检查等排除心脏器质性病变等。本研究经本院伦理学委员会批准。

2. MRI 扫描方案

使用 Siemens Magnetom Aera 1.5T 磁共振扫描仪,18 通道体线圈及心电门控技术。扫描前对受检者讲解 MR 检查的注意事项,并进行屏气训练。首先采集半傅里叶单次激发快速自旋回波序列(黑血序列)和真实稳态进动快速成像序列(亮血序列)心脏轴位像,再采用真实稳态进动快速成像序列采集两腔心、三腔心、四腔心、短轴位电影图像。电影序列扫描参数:TE 1.11 ms,TR 39.75 ms,层厚 8.0 mm,视野 340 mm \times 276 mm,体素大小 1.8 mm \times 1.8 mm \times 8.0 mm,带宽 930 Hz/pixel。

3. 图像分析及测量

图像数据分析和测量由两位具有 3 年以上心血管 MRI 诊断经验的放射科医师完成,取两者测量结果的平均值作为最终结果,具体的分析和测量步骤如下。①首先将原始数据传入后处理工作站 Siemens syngo MR D13,软件自动识别左心室内外膜,进行人工校正后,即可获得左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)的测量值。②应变力及应变率分析:将原始数据导入加拿大 Circle CVI 公司的 CVI42 5.12.1 软件,将左心室两腔心、三腔心、四腔心及短轴位电影序列的扫描数据导入 Tissue Tracking 3D 模型,对图像进行分析,采用人工智能模式勾画出心内膜及心外膜的轮廓,进行手动校正后(图 1),软件即可自动计算出左心室心肌的整体应变力及应变率,包括径向峰值应变力(peak radial strain, PRS)、周向峰值应变力(peak circumferential strain, PCS)、纵向峰值应

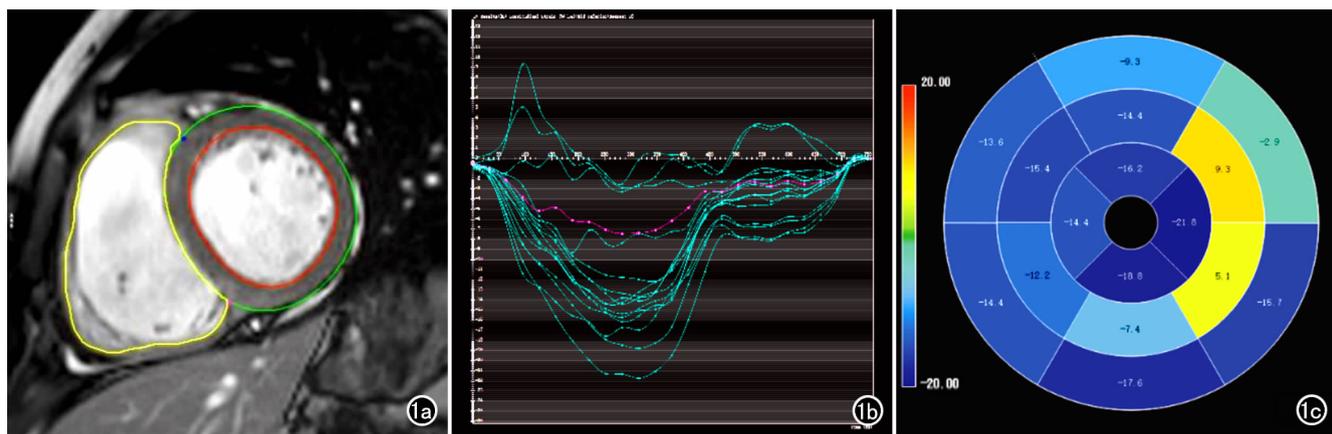


图1 女,22岁,急性心肌炎患者。a)在短轴位电影序列图像上 CVI 软件自动勾画出左心室心肌的心内膜(红色圆圈)、心外膜(绿色圆圈),从而可显示左心室心肌内外膜的运动轨迹,进而计算出心肌的应变参数;b) PLS-时间曲线,显示心肌不同节段的 PLS 与时间的关系改变,紫色曲线代表当前节段 PLS 随时间的变化曲线;c)左心室 PLS 的牛眼图,当左心室整体纵向应变力达到峰值时心肌各节段 PLS 的情况,色阶的颜色及数值代表 PLS 大小及方向。

变力(peak longitudinal strain, PLS)、收缩期径向峰值应变率(peak systolic radial strain rate, PSRSR)、收缩期周向峰值应变率(peak systolic circumferential strain rate, PSCSR)、收缩期纵向峰值应变率(peak systolic longitudinal strain rate, PLSLR)、舒张期径向峰值应变率(peak diastolic radial strain rate, PDRSR)、舒张期周向峰值应变率(peak diastolic circumferential strain rate, PDCSR)和舒张期纵向峰值应变率(peak diastolic longitudinal strain rate, PDLRSR)。

4. 统计学分析

使用 IBM SPSS 25.0、Graphpad prism 8.0.2 软件进行统计分析。计量资料采用均数±标准差的形式进行描述,先进行方差齐性检验,如果方差齐则采用独立样本 t 检验比较 aMC 组和对照组的年龄、身高、体重、BMI、LVEF 和左心室应变参数值的差异,如方差不齐则用校正 t 检验;采用卡方检验比较两组间性别构成的差异。采用受试者工作特征(ROC)曲线评价左心室应变参数诊断急性心肌炎的效能,采用 Spearman 相关系数分析左心室应变参数与 LVEF 的相关性。以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结果

1. 临床资料、LVEF 及应变参数值的比较

aMC 组和对照组临床资料、LVEF 和左心室整体应变参数值的比较结果见表 1、2。两组之间年龄、性别构成、身高、体重和 BMI 值的差异均无统计学意义($P > 0.05$);aMC 组 LVEF 和左心室各项应变参数值均低于对照组,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。

表 1 aMC 组和对照组临床资料及 LVEF 的比较

参数	对照组 (n=32)	aMC 组 (n=49)	t 值	P 值
年龄/岁	33.66±19.58	42.33±20.49	-1.895	0.062
性别(男/女)	17/15	27/22	0.030*	0.861
身高/cm	161.38±11.42	158.53±11.50	1.091	0.279
体重/kg	59.75±11.52	59.82±16.62	-0.020	0.984
BMI/kg/m ²	22.87±3.93	23.55±5.37	-0.615	0.540
LVEF	61.05%±6.28%	49.78%±15.06%	4.656	<0.001

注:*为卡方值。

表 2 aMC 组和对照组应变参数值的比较

参数	对照组	aMC 组 (n=49)	t 值	P 值
PRS	38.95%±8.90%	26.07%±13.60%	5.152	<0.001
PCS	-20.79%±2.33%	-15.58%±5.97%	-5.501	<0.001
PLS	-15.22%±3.30%	-10.86%±5.25%	-4.588	<0.001
PSRSR/s ⁻¹	2.20±0.58	1.61±0.87	3.706	<0.001
PSCSR/s ⁻¹	-1.09±0.15	-0.86±0.36	-4.030	<0.001
PLSLR/s ⁻¹	-0.84±0.22	-0.61±0.30	-3.607	0.001
PDRSR/s ⁻¹	-3.06±1.02	-1.96±1.20	-4.237	<0.001
PDCSR/s ⁻¹	1.47±0.36	1.00±0.42	5.272	<0.001
PDLRSR/s ⁻¹	1.06±0.32	0.73±0.35	4.194	<0.001

2. 左心室应变参数诊断 aMC 的效能评价

ROC 曲线分析显示左心室部分应变参数对检出急性心肌炎有一定价值,各项应变参数的诊断效能指标值详见表 3 和图 2。

表 3 左心室应变参数诊断 aMC 的 ROC 曲线分析结果

参数	AUC	临界值	敏感度	特异度	P 值
PRS	0.778	32.24%	61.22%	84.38%	<0.001
PCS	0.785	-19.67%	77.55%	75.00%	<0.001
PLS	0.738	-10.31%	46.94%	96.88%	<0.001
PSRSR	0.727	1.45/s ⁻¹	42.86%	96.88%	<0.001
PSCSR	0.723	-0.93/s ⁻¹	53.06%	93.75%	<0.001
PLSLR	0.734	-0.62/s ⁻¹	53.06%	90.63%	<0.001
PDRSR	0.766	-2.37/s ⁻¹	67.35%	78.13%	<0.001
PDCSR	0.783	1.24/s ⁻¹	69.39%	81.25%	<0.001
PDLRSR	0.762	1.05/s ⁻¹	85.71%	56.25%	<0.001

左心室周向应变力的 AUC 最大,为 0.785,相应

的诊断敏感度为 77.55%、特异度为 75.00%，此外，左心室舒张期径向应变率、周向应变率和纵向应变率的诊断敏感度也均在 65% 以上。

3. 左心室应变参数与 LVEF 相关性分析

左心室径向、周向和纵向应变力及其在收缩期和舒张期的应变率与 LVEF 均具有一定的相关性，其中左心室径向应变力和周向应变力与 LVEF 呈高度相关(r 值分别为 0.809 和 -0.904 , P 均 <0.001), 详见表 4 和图 3~4。

表 4 左心室应变参数与 LVEF 的相关性分析结果

左心室应变参数	r 值	P 值
PRS	0.809	<0.001
PCS	-0.904	<0.001
PLS	-0.666	<0.001
PSRSR	0.758	<0.001
PSCSR	-0.731	<0.001
PSLSR	-0.547	<0.001
PDRSR	-0.711	<0.001
PDCSR	0.720	<0.001
PDLSR	0.508	<0.001

讨论

CMR-FT 是通过测量心肌内外膜的运动轨迹来计算心肌应变参数, 从而无创性评价心肌整体和局部运动功能的一项技术。心肌应变是指心肌在张力作用下的形变能力, 包括径向、纵向和周向等方向的应变参数; 径向是指心肌向心性收缩时的厚度变化; 纵向是指长轴方向心肌纤维长短的变化; 周向是指心肌纤维沿圆周旋转时长短的变化^[5]。应变率是指单位时间内心肌发生形变的速度。目前心肌应变已成为研究心脏功能的热点, 在缺血性心脏病中应变参数值较健康志愿者明显减低, 心肌纵向应变力可作为评价早期左心室功能改变的可靠指标, 是评价心血管不良预后的独立

预测因子^[6]。本研究运用 CMR-FT 评价急性心肌炎患者左心室心肌的应变功能, 并探讨各项应变参数与 LVEF 相关性。

本研究结果显示, aMC 患者心肌应变和收缩期应变率均较对照组明显减低($P<0.05$), 表明 aMC 患者收缩功能受限, 炎性细胞已经浸润心肌细胞导致心肌细胞水肿、变形, 进而引起左心室应变的改变。陈海霞等^[7]的研究中也发现左心室径向、纵向和周向应变力及应变率均较健康志愿者明显减低, 其测量的 PRS、PCS 和 PLS 分别为 $29.99\% \pm 10.16\%$ 、 $-15.39\% \pm 2.86\%$ 、 $-14.33\% \pm 2.78\%$, 与我们的测量结果基本一致。Secchi 等^[8]对 aMC 患者进行研究并进行后期随访, 其研究结果亦显示 aMC 患者的左心室径向和周向应变力均较正常组明显减低, 而且周向应变力与左心室延迟强化相关。Li 等^[9]在针对暴发性心肌炎的研究中也发现患者的各项心肌应变参数均明显减低。但以往的研究中大部分仅局限于对心肌应变和收缩期应变率的研究, 本研究在此基础上进一步对 aMC 患者与对照组的舒张期应变率进行了对照研究, 发现 aMC 患者舒张期应变率也较对照组降低, 表明 aMC 患者病变发展到一定阶段, 心肌细胞纤维化、硬化及内皮功能障碍导致舒张功能受损^[10]。

本研究中对应变参数进行 ROC 曲线分析, 结果显示 PCS 为诊断 aMC 的最佳参数, AUC 为 0.785, 以 -19.67% 为其临界值, 诊断敏感度为 77.55%, 特异度为 75.00%。Chen 等^[11]发现以 -19.72% 为 PCS 的临界值, 诊断 aMC 的敏感度为 68%, 特异度为 88%。Doimo 等^[12]研究结果为以 -16.0% 作为 PCS 的临界值, 诊断 aMC 的敏感度为 65%, 特异度为 65%。陈晓荣等^[13]的研究中, PCS 以 -20.14% 为临界值时, 诊断 aMC 的敏感度为 73%, 特异度为 84%, 以上研究均表

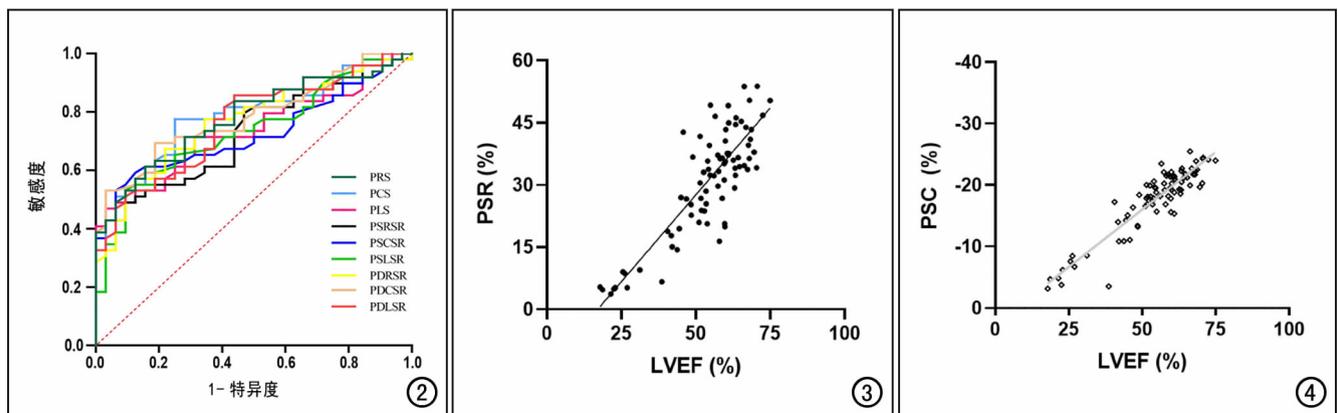


图 2 左心室各项应变参数诊断急性心肌炎的 ROC 曲线, 显示 PCS 诊断急性心肌炎的效能最高, $AUC=0.785$ 。图 3 PRS 与 LVEF 相关性分析散点图, 显示 PRS 与 LVEF 具有高度相关性($r=0.809$, $P<0.001$)。图 4 PCS 与 LVEF 相关性分析散点图, 显示 PCS 与 LVEF 具有高度相关性($r=-0.904$, $P<0.001$)。

明,CMR-FT 对诊断急性心肌炎具有较高的价值,但 PCS 的临界值不尽相同。这可能与研究中纳入的急性心肌炎患者的心肌损伤程度、扫描仪器及后处理软件等因素有关,在今后研究中还需要开展临床多中心研究及将患者进一步细化分类,进而制订标准化参考值。除此之外,本研究还进一步对左心室心肌应变率诊断急性心肌炎的效能进行了分析,发现 PDRSR、PDCSR 和 PDLSR 诊断 aMC 的敏感度均在 65% 以上,具有一定的诊断价值,同时也为诊断 aMC 提供了更多的参数指标。

LVEF 指每搏输出量占左心室舒张末期容积量的百分比,可反映左心室整体收缩功能的变化,正常值通常为 50%~70%。而新近出现的心肌应变参数是反映心室收缩功能的重要指标,因此,本研究对心肌炎应变参数与 LVEF 进行了相关性分析,结果显示左心室径向、周向和纵向应变力及各项应变率与 LVEF 均具有一定的相关性,其中 PRS 和 PCS 与 LVEF 具有高度相关性(r 值分别为 0.809、-0.904, P 均 <0.01),表明心肌应变参数与 LVEF 在反映心肌收缩功能受损方面具有较好的一致性。黄荟玉等^[14]的研究结果亦显示心肌径向、周向和纵向应变力与 LVEF 存在一定相关性(r 值分别为 0.692、-0.506 和 0.623, P 均 <0.01)。Andre 等^[15]的研究中也证实了心肌径向、周向和纵向应变力均与 LVEF 存在一定相关性(r 值分别为 0.60、-0.75 和 -0.62, P 均 <0.01)。Chen 等^[11]的研究结果亦表明 LVEF 与 PCS 具有较高的相关性($r = -0.67, P < 0.05$)。上述结果均表明心肌受损程度越重,心肌收缩功能下降越明显。

本研究尚存在一定的不足之处:样本量偏少而且是单中心研究,在今后的研究中我们将联合部分三甲医院开展多中心大样本研究;既往的研究中对 LVEF 正常组和异常组进行了心肌应变参数的对照分析,故本研究中未再进行分组讨论,但本研究中进一步对心肌应变参数与 LVEF 的相关性以及心肌应变、应变率所有参数的诊断效能进行了探讨。

综上分析,CMR-FT 对急性心肌炎具有较高的临床实用价值,可通过评价左心室心肌应变功能进而反映心脏受损程度。除此之外,CMR-FT 在评价心肌梗死、肥厚型心肌病等心肌功能受损方面也表现出了较高的实用价值^[16-17],为临床治疗提供了重要的参考依据,这也为我们下一步研究其它心血管疾病提供了新的思路。

参考文献:

[1] Blanco-Domínguez R, Sánchez-Díaz R, de la Fuente H, et al. A novel circulating microRNA for the detection of acute myocarditis [J]. *N Engl J Med*, 2021, 384(21):2014-2027.

- [2] 牟俊,王嶂,刘新峰,等.心脏磁共振 T₂-mapping 技术在急性心肌炎中的应用价值[J]. *放射学实践*, 2020, 35(11):1424-1428.
- [3] 中华医学会儿科学分会心血管学组,中华医学会儿科学分会心血管学组心肌炎协作组,中华儿科杂志编辑委员会,等.儿童心肌炎诊断建议(2018 年版)[J]. *中华儿科杂志*, 2019, 57(2):87-89.
- [4] Caforio AL, Pankuweit S, Arbustini E, et al. Current state of knowledge on aetiology, diagnosis, management, and therapy of myocarditis: a position statement of the European Society of Cardiology Working Group on Myocardial and Pericardial Diseases [J]. *Eur Heart J*, 2013, 34(33):2636-2648.
- [5] Huo H, Dai X, Li S, et al. Diagnostic accuracy of cardiac magnetic resonance tissue tracking technology for differentiating between acute and chronic myocardial infarction [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(7):3070-3081.
- [6] Eitel I, Stiermaier T, Lange T, et al. Cardiac magnetic resonance myocardial feature tracking for optimized prediction of cardiovascular events following myocardial infarction [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(10):1433-1444.
- [7] 陈海霞,蒋瑾,蒲红,等.磁共振组织追踪技术定量评估急性心肌炎左室心肌应变[J]. *实用医学杂志*, 2018, 34(22):3783-3786, 3791.
- [8] Secchi F, Monti CB, Ali M, et al. Diagnostic value of global cardiac strain in patients with myocarditis [J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2020, 44(4):591-598.
- [9] Li H, Zhu H, Yang Z, et al. Tissue characterization by mapping and strain cardiac MRI to evaluate myocardial inflammation in fulminant myocarditis [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020, 52(3):930-938.
- [10] Eurlings C, Heymans S. Diastolic heart failure after acute myocarditis, a new discovery in inflammatory cardiomyopathies? [J]. *Heart*, 2011, 97(9):685-686.
- [11] Chen X, Hu H, Pan J, et al. Performance of cardiovascular magnetic resonance strain in patients with acute myocarditis [J]. *Cardiovasc Diagn Ther*, 2020, 10(4):725-737.
- [12] Doimo S, Ricci F, Aung N, et al. Tissue-tracking in the assessment of late gadolinium enhancement in myocarditis and myocardial infarction [J/OL]. *Magn Reson Imaging*, 2020, 73:e62-e69. DOI:10.1016/j.mri.2020.08.008.
- [13] 陈晓荣,张晓茹,胡轶,等.磁共振特征追踪技术在急性心肌炎中的评估[J]. *影像诊断与介入放射学*, 2020, 29(2):119-124.
- [14] 黄荟玉,张勇,程敬亮,等.采用磁共振心肌组织追踪技术定量评估急性心肌炎患者左心室心肌应变率[J]. *中华生物医学工程杂志*, 2020, 26(4):289-294.
- [15] Andre F, Stock FT, Riffel J, et al. Incremental value of cardiac deformation analysis in acute myocarditis: a cardiovascular magnetic resonance imaging study [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2016, 32(7):1093-1101.
- [16] Zou Q, Zheng T, Zhou SL, et al. Quantitative evaluation of myocardial strain after myocardial infarction with cardiovascular magnetic resonance tissue-tracking imaging [J]. *Int Heart J*, 2020, 61(3):429-436.
- [17] Palumbo P, Masedu F, de Cataldo C, et al. Real-world clinical validity of cardiac magnetic resonance tissue tracking in primitive hypertrophic cardiomyopathy [J]. *Radiol Med*, 2021, 126(12):1532-1543.