

心脏磁共振组织追踪 2D 与 3D 应变评估实验性自身免疫性心肌炎模型大鼠的诊断价值及可重复性研究^{*}

朱 静¹, 朱 桐¹, 张 钰¹, 陈榆舒¹, 何 博¹, 王 磊¹, 刘小新², 杨汐静³, 邰发宝^{1△}

1. 四川大学华西医院 放射科(成都 610041); 2. 宁夏医科大学(银川 750004);

3. 四川大学华西医院 动物实验中心(成都 610041)

【摘要】 目的 探讨心脏磁共振组织追踪(cardiac magnetic resonance tissue tracking, CMR-TT)二维(two-dimensional, 2D)与三维(three-dimensional, 3D)应变对实验性自身免疫性心肌炎大鼠的诊断价值及其可重复性。**方法** 将 20 只 Lewis 大鼠随机等分为模型组和对照组,大鼠足垫皮下注射猪心肌凝蛋白以制备自身免疫性心肌炎动物模型,在初次注射后第 35 天进行 7.0T CMR 电影序列扫描,心脏专用后处理软件分析左心室心功能及整体应变。磁共振扫描完成后处死大鼠,取心肌组织行 HE 和 Masson 染色,以病理结果为金标准,通过受试者工作特性(ROC)曲线评价各应变参数的诊断价值,各应变值的重复性检验采用组内相关系数(ICC)、变异系数(CV)、Bland-Altman 图分析。**结果** 病理学发现对照组心肌细胞形态结构未见明显异常改变,模型组所有大鼠均感染心肌炎,表现为心肌纤维排列紊乱、变性、坏死、炎细胞浸润、间质纤维化,造模成功。ROC 曲线显示 2D 应变参数诊断心肌炎的价值高于 3D 应变参数,2D 整体环向应变(global circumferential strain, GCS)、2D 整体径向应变(global radial strain, GRS)、2D 整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)、3D GLS、3D GCS、3D GRS 的曲线下面积(AUC)分别为 0.96、0.95、0.90、0.87、0.85、0.77;观察者内和观察者间 3D 应变重复性(ICC 在 0.421~0.79)均低于 2D 应变(ICC 在 0.893~0.986)。**结论** CMR-TT 2D 应变参数在心肌炎诊断价值以及心肌形变分析中的可行性、可重复性方面均优于 3D 应变参数。

【关键词】 磁共振组织追踪 实验性自身免疫性心肌炎 2D 心肌应变 3D 心肌应变

Diagnostic Values and Reliability of Cardiac Magnetic Resonance Tissue Tracking 2D and 3D Strain Assessments for Experimental Autoimmune Myocarditis in Rats ZHU Jing¹, ZHU Tong¹, ZHANG Yu¹, CHEN Yu-shu¹, HE Bo¹, WANG Lei¹, LIU Xiao-xin², YANG Xi-jing³, GAO Fa-bao^{1△}. 1. Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 2. Ningxia Medical University, Yinchuan 750004, China; 3. Animal Experiment Center, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

△ Corresponding author, E-mail: gaofabao@wchscu.cn

【Abstract】 Objective To determine the diagnostic values and reliability of cardiac magnetic resonance tissue tracking (CMR-TT) derived two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) strains in assessing experimental autoimmunity myocarditis (EAM) in rats. **Methods** 20 Lewis rats were randomly divided into model and control groups. The animal model of autoimmune myocarditis was induced by injecting porcine cardiac myosin into the footpads of the rats. On day 35, all of the rats were examined using the 7.0T CMR cine scan. The cardiac function and global strain of the left ventricular of the rats were analyzed with specific cardiac post-processing. The rats were then sacrificed and myocardial samples were taken and stained with HE and Masson. The diagnostic values of the strain parameters were assessed by receiver operating characteristic (ROC) curves with the pathological results as diagnostic criteria. The reliability of the strain parameters were tested using interclass correlation coefficient (ICC), coefficients of variation (CV) and Bland-Altman. **Results** No abnormal pathological changes in myocardial cells were found in the control group. Myocarditis was successfully induced in all of the rats in the model group, showing myocardial fiber arrangement disorder, degeneration, necrosis, inflammatory cell infiltration and interstitial fibrosis. The ROC showed that 2D global strain parameters possessed higher diagnostic values than 3D strain parameters. The 2D had an area under the curve (AUC) of 0.96 in global circumferential strain (GCS), 0.95 in global radial strain (GRS), and 0.90 in global longitudinal strain (GLS), compared with 0.87 GCS, 0.85 GRS, and

^{*} 国家自然科学基金(No. 81520108014, No. 81771800, No. 81829003), 国家科技部重大研究项目(No. 2016YFA0201402)和四川省科技厅国际合作项目(No. 2017HH0045)资助

△ 通信作者, E-mail: gaofabao@wchscu.cn

0.77 GLS in the 3D, respectively. The reliability of the 2D strain parameters was high, except for inter-observer 2D GRS ($ICC = 0.893$). The 3D strain parameters had lower reliability ($ICCs: 0.421-0.79$) than the 2D strain parameters ($ICCs: 0.893-0.986$). **Conclusion** The diagnostic values of 2D strain parameters are higher than 3D strain parameters in diagnosing myocarditis.

【Key words】 Tissue tracking magnetic resonance imaging Experimental autoimmune myocarditis 2D myocardium strain 3D myocardium strain

近年来,心脏磁共振组织追踪技术(cardiac magnetic resonance tissue tracking, CMR-TT)已成为多种心脏疾病的研究热点,为心血管疾病的诊断、预后评价提供重要的信息^[1-2]。CMR-TT 基于电影序列图像,利用后处理软件分析、量化心肌整体和局部运动及形变情况^[3],具有良好的重复性、可行性^[4-6]。与常规射血分数对心室功能评价相比,应力在心脏疾病早期就发生变化,因此能敏感地检测到早期心脏收缩、舒张功能不全^[7]。CMR-TT 二维(two-dimensional, 2D)应变、三维(three-dimensional, 3D)应变是心肌应变的重要参数,2D应变在短轴或长轴平面追踪心肌心内、外膜下组织体素的运动,使用 2D 算法定量心肌形变,在追踪过程中不涉及三维重建;3D 应变是在短轴和长轴图像的基础上重建左室的三维结构,追踪心肌上的像素点位置和使用 3D 算法^[8]定量心肌形变。目前国内外关于比较 CMR-TT 2D 与 3D 心肌应变的可重复性及诊断价值的研究较少。心肌炎是一种常见的心脏炎性疾病,其中病毒感染是心肌炎最常见的病因,临床表现多样,是青少年猝死的常见原因,部分患者最终发展形成扩张型心肌病,出现慢性心力衰竭^[9]。病毒性心肌炎病程中免疫性损伤阶段在心肌炎后期发展为扩张型心肌病以及心肌纤维化形成中起着关键作用^[10],深入了解相关免疫机制、探索新的防治措施对于预防后期不良心血管事件发生、改善心肌炎预后至关重要;但临床上心肌炎确诊主要以病理活检为依据,其创伤大,且由于取材部位等影响导致诊断敏感性及特异性不高而未被广泛应用,实验性自身免疫性心肌炎(experimental autoimmunity myocarditis, EAM)大鼠模型是理想的复制人类心肌炎的动物模型,模拟人类病毒性心肌炎的免疫性损伤阶段,具有明确的病因,且能进行心肌组织病理学检查,基于该模型进行基础和临床的研究有利于深入了解心肌炎的发病特征。已有研究报道心肌应变分析对心肌炎的诊断具有一定的价值^[1, 7],本研究通过制备 EAM 大鼠模型并进行 CMR 成像,利用 CMR-TT 分析心肌应变,并以病理结果作为诊断标准,探讨、比较 2D 与 3D 心肌应变在心肌炎中的诊断价值,以及对 2D 与 3D 形变的重复性进行比

较。

1 材料与方法

1.1 主要材料和仪器

20 只健康雄性 Lewis 大鼠,体质量为 200~250 g,SPF 级,购自北京维通利华实验动物有限公司。所有实验步骤均经过四川大学华西医院实验动物保护和使用委员会批准。猪心肌肌凝蛋白(美国 Sigma 公司);完全弗氏佐剂(美国 Sigma 公司)。7.0 T Bruker BIOSPEC 70/30(Germany)磁共振。

1.2 模型制备与分组

将 20 只 Lewis 大鼠随机分为模型组与对照组,每组各 10 只。将猪心肌肌凝蛋白与等体积的完全弗氏佐剂充分混合,配置成乳化剂,分别于第 0、7 天在模型组大鼠足垫皮下注射,每只大鼠每次注射 0.2 mL 乳化剂(含 1 mg 猪心肌肌凝蛋白),对照组注射等体积的完全弗氏佐剂。

1.3 CMR 检查

应用 7.0 T CMR 于初次注射后第 35 天行大鼠心脏扫描,选用内径 72 mm 的射频信号发射线圈与内径 56 mm 的阵列表面回波信号接收线圈。将大鼠置于通有氧气与异氟烷混合气体的密闭玻璃缸内,待大鼠完全麻醉后迅速放入扫描床并使用大鼠专用面罩持续吸入麻醉,在大鼠双前肢及右后肢插入心电电极、腹部放置呼吸感应器后待心电、呼吸平稳后进床行磁共振扫描。扫描序列:梯度回波电影序列(cine FLASH);参数设置:重复时间(TR) = 8.0 ms;回波时间(TE) = 2.5 ms;翻转角(FA) = 15°;视野(FOV) = 50 mm × 50 mm;矩阵 = 256 × 256;层厚 = 1.5 mm;层间距 = 0 mm;每个心动周期 20 个时相,每层扫描 15 min。扫描层面包括左心室(left ventricular, LV)连续短轴,长轴两腔心、三腔心及四腔心。

1.4 图像后处理

将扫描后所得的左室连续短轴、长轴两腔心、三腔心及四腔心 DICOM 图像导入心脏多功能后处理软件 CVI⁴² (Circle Cardiovascular Imaging, 加拿大)进行心功能及应变分析。将连续短轴图像添加至 short-3D 模块进行心功能分析,于舒张末期和收

缩末期手动勾画左室内外膜,乳头肌包括在血池容积内,左室流出道包括在心室容积内,获得左室舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV)、收缩末期容积(end-systolic volume, ESV)及射血分数(ejection fraction, EF)、舒张期质量[Myo Mass(diast)],收缩期质量[Myo Mass(syst)]。将连续短轴及 3 个长轴图像添加至 Tissue-Tracking 模块进行应变分析,于舒张末期勾画左心室内外膜,进行组织追踪,由软件自动获取 2D 及 3D 结果。2D 径向应变在长轴或短轴方向获得,本研究选用 2D 长轴径向应变、2D 环向应变在短轴方向获得,2D 纵向应变在长轴方向获得;3D 应变由短轴与长轴方向共同获得。本研究纳入以下应变参数:2D 及 3D 整体环向应变(global circumferential strain, GCS)、2D 及 3D 整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)、2D 及 3D 整体径向应变(global radial strain, GRS)。

1.5 病理学检查

磁共振扫描完成后当日,尾静脉注射氯化钾处死大鼠,取出心脏,将心肌组织用甲醛固定,梯度酒精脱水,石蜡包埋,切片,行常规 HE、Masson 染色,光学显微镜下观察炎细胞浸润,心肌变性、坏死及心肌纤维化情况。

1.6 重复性检验

为评估 CMR-TT 在观察者间及观察者内的重复性,由 2 名经验丰富的观察者采用双盲法对所有大鼠的图像进行短轴及长轴应变分析,其中一名观察者在 4 周后再次对所有大鼠进行应变分析,计算观察者内和观察者间各参数的重复性。

1.7 统计学方法

所有定量资料均采用 Shapiro-Wilk 检验以及

Q-Q 图进行正态性检验,符合正态性的值采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,不符合的采用中位数表示。除重复性检验外,所有统计学分析参数均选择观察者内重复性分析中第一次测量值。采用受试者工作特性(receiver operating characteristic, ROC)曲线评价心肌应变参数的诊断效能。采用独立样本 *t* 检验或 Wilcoxon 秩和检验对两组大鼠进行心功能及应变参数比较。观察者内和观察者间的重复性检验采用组内相关系数(interclass correlation coefficient, ICC)、变异系数(coefficients of variation, CV)、Bland-Altman 图分析, $ICC \geq 0.90$ 认为重复性非常好, $0.75 \sim <0.90$ 认为重复性较好, $0.50 \sim <0.75$ 认为一般, <0.50 认为重复性较低。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般情况

与对照组大鼠相比较,模型组大鼠在建模后第 14 天左右开始出现体质量下降,精神萎靡,活动、进食减少,毛色灰暗毛糙,安静状态下出现呼吸急促,第 21 天左右症状最严重,第 25 天左右症状开始减轻,进食、活动及体质量增加。

2.2 组织病理学表现

初次注射后第 35 天,病理学发现正常组心肌细胞形态结构未见明显异常改变,模型组所有大鼠均感染心肌炎,病变主要位于心外膜及心肌中层,表现为心肌纤维排列紊乱、变性、坏死、炎细胞浸润、间质纤维化,造模成功。见图 1。

2.3 CMR 扫描分析结果

2.3.1 一般资料 根据正态检验结果,所有连续性变量均满足正态分布。模型组与对照组的一般资料

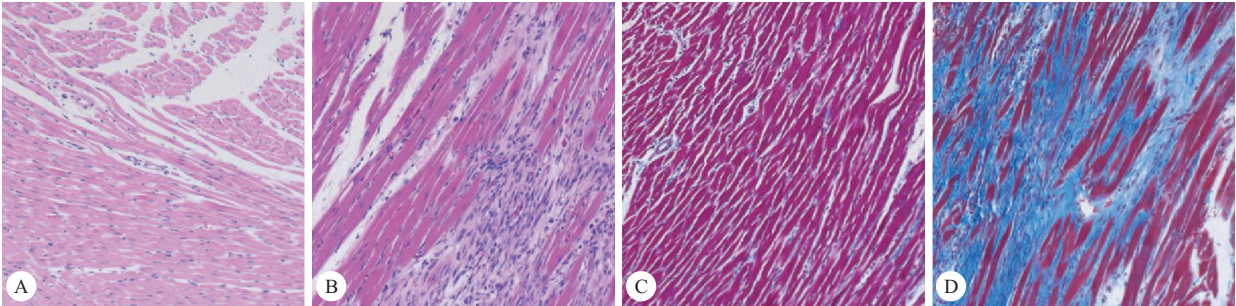


图 1 两组大鼠心肌组织的 HE 和 Masson 染色。×20

Fig 1 HE and Masson staining in rats. ×20

A: HE staining in rats of the control group; B: HE staining in rats of the model group; C: Masson staining in rats of the control group; D: Masson staining in rats of the model group

如表 1 所示,两组大鼠的 EF、Myo Mass (diast)、Myo Mass (syst) 的差异均有统计学意义,EDV、ESV、SV 的差异无统计学意义。

表 1 模型组与对照组一般资料比较

Table 1 Characteristics of the model and control groups				
Index	Model group (n=10)	Control group (n=10)	t	P
EDV/mL	0.38±0.04	0.39±0.03	-0.452	0.656
ESV/mL	0.14±0.02	0.13±0.02	1.724	0.102
SV/mL	0.24±0.03	0.26±0.02	-1.952	0.067
EF/%	62.43±2.10	67.30±3.93	-3.445	0.003
Myo Mass (diast)/g	0.35±0.06	0.27±0.03	3.732	0.003
Myo Mass (syst)/g	0.44±0.08	0.37±0.04	2.485	0.027

EDV: End-diastolic volume; ESV: End-systolic volume; SV: Stroke volume; EF: Ejection fraction; Myo Mass (diast): Diastolic myocardial mass; Myo Mass (syst): Systolic myocardial mass

2.3.2 左心室整体 2D、3D 各方向心肌应变 模型组 LV 心肌整体 2D、3D 各方向应变值均低于对照

表 2 模型组与对照组左心室 CMR-TT 2D、3D 应变参数比较/%

Group	2D			3D		
	GRS	GCS	GLS	GRS	GCS	GLS
Model	33.39±5.97	-21.29±1.40	-18.94±2.20	47.71±15.34	-19.47±2.05	-14.80±3.16
Control	44.71±4.83	-24.43±1.36	-22.12±1.36	61.55±7.58	-23.13±2.96	-18.94±2.91
t	-4.521	5.087	3.891	-2.558	3.21	3.051
P	<0.001	<0.001	0.001	0.024	0.005	0.007

2D: 2 dimension; 3D: 3 dimension; GRS: Global radial strain; GCS: Global circumferential strain; GLS: Global longitudinal strain

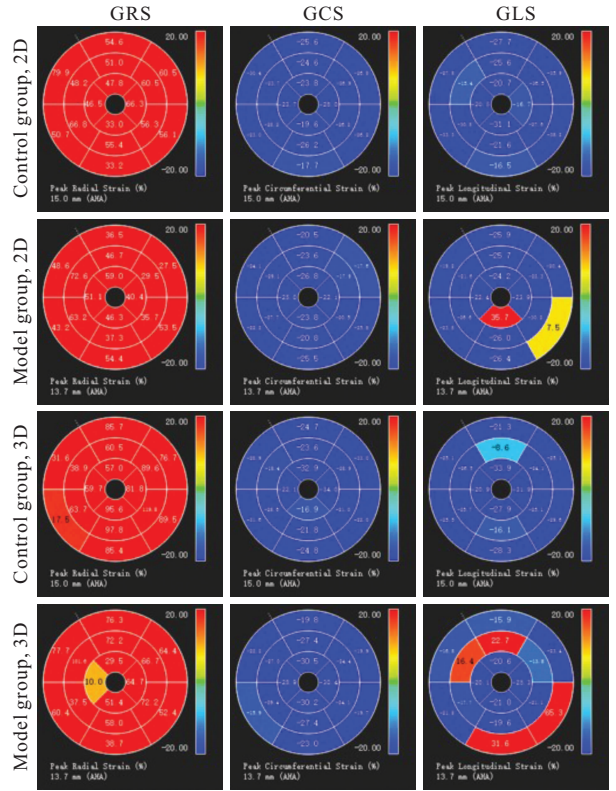


图 2 两组大鼠心脏 16 节段应变牛眼图

Fig 2 Bull's eye diagram of 16-segmental strain in rats

The color depicted strain value between -20 (blue/green transition) and 20 (green/red transition)

组,差异有统计学意义($P<0.05$),见表 2、图 2。

2.3.3 CMR-TT 2D、3D 应变参数对 EAM 的诊断价值 以心肌细胞炎性浸润、心肌变性、坏死、心肌间质纤维化等病理表现作为 EAM 的诊断标准,分别对 2D 及 3D 的 GRS、GCS、GLS 共 6 个诊断指标绘制 ROC 曲线。2D GCS(AUC=0.96)与 2D GRS(AUC=0.95)对心肌炎的诊断价值均非常高,两者差异无统计学意义。3D GRS(AUC=0.77)诊断价值最低,3D 应变参数的诊断价值均低于 2D 应变参数,如图 3、表 3 所示。

2.3.4 重复性检验 见表 4、图 4,ICC 分析显示观察者内和观察者间 2D 应变的重复性均高于 3D 应变。观察者内及观察者间 2D 应变的变异度(CV 均<10%)均低于 3D 应变。Bland-Altman 一致性检

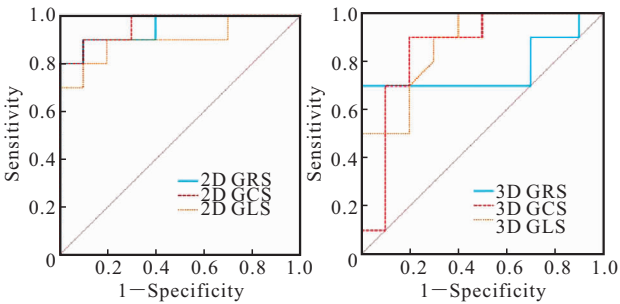


图 3 2D(左)及 3D(右)应变参数的 ROC 曲线图

Fig 3 ROC curves of 2D (left) and 3D (right) strain parameters

验显示,所有应变参数的绝大多数点位于 95%一致性界限范围(limit of agreement, LoA)内,观察者内和观察者间 2D 应变参数的差值的均数、95%LoA 均低于 3D 应变参数,表明观察者内和观察者间 2D 应变测量的重复性均高于 3D 应变。与观察者间的重复性相比,观察者内的重复性相对更好。

3 讨论

本研究中,经病理证实模型组所有大鼠均感染心肌炎,表明模型制备成功;EF、Myo Mass (diast)、Myo Mass (syst) 等指标在模型组与对照组间差异有统计学意义,EDV、ESV、SV 无明显差异,提示模

表 3 CMR-FT 应变参数诊断 EAM 的 ROC 分析

Table 3 ROC analyses on the CMR-FT strain parameter diagnosis for EAM

Parameter	AUC (95%CI)	P	Cut-off/%	Sensitivity/%	Specificity/%	Youden index
2D GRS	0.95 (0.75-0.99)	<0.001	37.49	80	100	0.8
2D GCS	0.96 (0.66-1.00)	<0.001	-22.58	90	90	0.8
2D GLS	0.90 (0.68-0.99)	<0.001	-21.12	90	80	0.7
3D GRS	0.77 (0.53-0.93)	0.024	48.26	70	100	0.7
3D GCS	0.85 (0.62-0.97)	<0.001	21.48	90	80	0.7
3D GLS	0.87 (0.64-0.96)	<0.001	18.27	100	60	0.6

2D, 3D, GRS, GCS, GLS; Denote the same as those in table 2

表 4 观察者内及观察者间各应变参数的重复性检验

Table 4 Intra- and inter-observer reliability tests of all strain parameters

Parameter	ICC (95%CI)		CV/%	
	Intra-observer	Inter-observer	Intra-observer	Inter-observer
2D GRS	0.922 (0.817±0.968)***	0.893 (0.747±0.957)***	5.28	6.79
2D GCS	0.986 (0.965±0.994)***	0.985 (0.962±0.994)***	-1.14	-1.12
2D GLS	0.907 (0.783±0.962)***	0.909 (0.788±0.963)***	-3.43	-3.84
3D GRS	0.612 (-0.252±0.825)**	0.421 (-0.021±0.724)*	16.75	19.73
3D GCS	0.790 (0.549±0.911)***	0.738 (0.443±0.888)***	-6.26	-6.81
3D GLS	0.561 (0.178±0.799)**	0.730 (0.435±0.884)***	-16.14	-12.74

2D, 3D, GRS, GCS, GLS; Denote the same as those in table 2. * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$

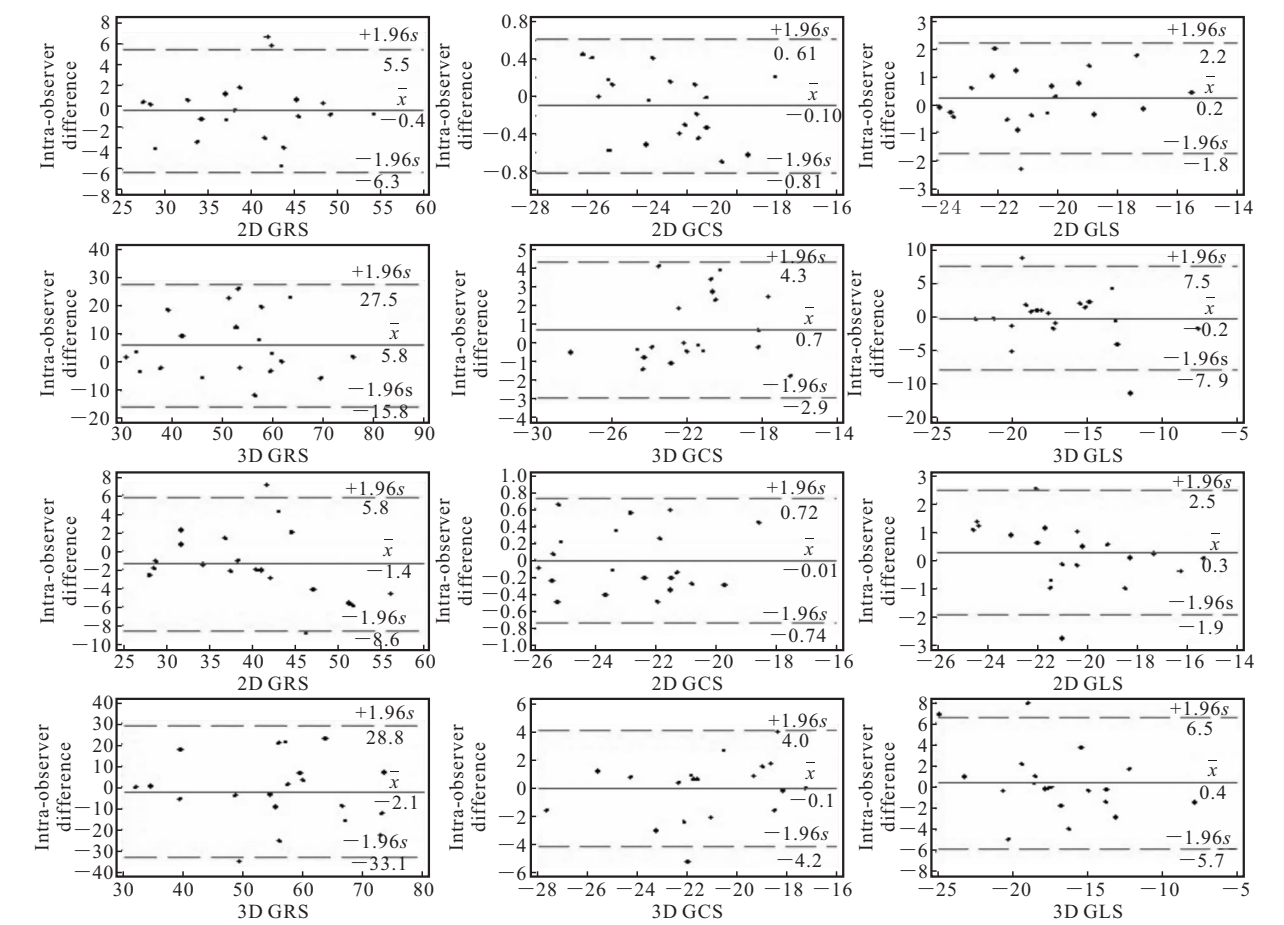


图 4 CMR-TT 2D 及 3D 应变参数的 Bland-Altman 一致性检验图

Fig 4 Intra-observer Bland-Altman consistency tests of CMR-TT 2D and 3D strain parameters

Two dashed lines represented the 95% limit of agreement, and the solid blue line represented the mean difference

型组心功能较对照组下降,模型组左室质量增加而容积未发生明显变化,提示左室重塑尚处于代偿期;模型组所有心肌应变参数均低于对照组,差异有统计学意义($P<0.05$);根据病理诊断结果,将大鼠分为模型组与对照组,应用ROC曲线分别对6个整体应变参数单独进行诊断效能比较,结果显示整体2D应变(AUC均 >0.90)的诊断价值均高于整体3D应变(AUC均 <0.90);所有应变参数经重复性检验发现整体2D应变的重复性均高于整体3D应变;提示临床应用中整体2D应变可能是更好的形变指标。

研究报道左心室心肌应变参数是心血管事件及疾病进展的重要预测指标^[11-12]。本研究发现模型组所有应变值均低于对照组,表明EAM大鼠心脏功能受损,原因可能是EAM心肌炎症引起的心肌细胞变性、坏死、充血、水肿以及心肌间质纤维化等多种病理改变导致心肌形变受损,与文献研究结果相似^[1,7];提示心肌应变分析评估心肌炎具有一定的价值,可能是由于心外膜下斜向走形的心肌纤维在心肌运动过程中既产生环向形变也产生纵向形变^[13-14],心肌径向形变由全层心肌决定,心肌炎主要累及心外膜与主要产生环向形变的心肌中层,因此3个方向的应变参数都会降低。

本研究发现整体2D应变参数值对心肌炎的诊断价值均高于整体3D应变参数,提示2D应变参数可能是更好的无创性检查心肌炎心肌受损的形变指标,而3D应变参数的诊断价值相对较低。另外2D GCS的诊断价值最高,AUC为0.96,当2D GCS的临界值为 -22.58% 时,诊断心肌炎的灵敏度为90%,特异度为90%,但与2D GRS诊断价值之间无明显差异,可能与心肌炎主要累及心外膜及心肌中层,这两处心肌纤维对产生环向应变以及径向应变的贡献大于纵向应变有关,因此心肌环向及径向形变受损能更好地被检测到。

目前,已有研究表明心肌应变分析具有一定的临床应用价值及较高的可重复性^[5-6,15]。本研究对整体2D、3D各方向应变参数的测量经重复性检验,发现无论观察者内或观察者间,整体2D各方向应变参数的可重复性均明显高于整体3D各方向应变参数,原因可能是2D应变在长轴或短轴平面上进行组织追踪,该平面上组织可视化良好,通过平面运动较小,图像质量较高,时间、空间分辨率好,组织追踪较好;而3D组织追踪在长轴方向上通过平面的有效分辨率较低^[16],且3D图像的时间、空间分辨率

低于2D图像^[8]。ZHU等^[8]对CMR-TT 2D和3D应变参数复测发现2D应变参数的重复性高于3D应变参数,与本研究结论类似。但LIU等^[17]报道3D应变可重复性高于2D应变,与本研究结论相反,出现这种差异的原因可能是本研究2D及3D应变是在所有短轴及长轴层面进行分析的,而LIU等2D应变仅在左心室中部短轴层面进行分析,3D应变在所有短轴及长轴层面进行分析,且其研究仅分析了正常人群,而本研究对病例组及正常组均进行了分析,因此对于该结论的证实还需要进一步深入研究。本研究还发现2D GCS的重复性最高,变异最小,与之前的研究^[8]类似。与GCS、GLS相比,GRS的重复性相对更低,可能与收缩期肌小梁间可见的血池空间减少而夸大了心内膜内移程度,造成追踪出的内外膜之间的心肌厚度比实际厚度更大有关,也可能是心肌与邻近组织的位移难以被区分而造成心肌与邻近组织重叠导致重复性较低^[16]。SCHMIDT等^[6]利用CMR-TT分析左右心室心肌应变的可重复性,发现双心室整体及局部CS、LS可重复性较高而RS重复性较低,与本研究结论相似,提示2D GCS、2D GLS能更准确地评估左心室心肌应变,可能是临床应用中更重要、更可靠的形变指标。

综上所述,CMR-TT应变技术能够准确评价EAM大鼠左心室心功能异常,并且整体2D应变参数的可行性、可重复性、稳定性及诊断价值均优于整体3D应变参数,2D应变参数可能是心血管疾病研究中评价心功能更理想的形变指标。

本研究并没有进行左心室局部及节段心肌应变评估,这是不足之处,此外,不同的组织追踪后处理软件计算出的应变参数重复性高低也需进一步深入研究,从而为研究心脏疾病提供可靠的信息以及更广泛地应用于临床。

参 考 文 献

- [1] BAESSLER B, SCHAARSCHMIDT F, DICK A, *et al.* Diagnostic implications of magnetic resonance feature tracking derived myocardial strain parameters in acute myocarditis. *Eur J Radiol*, 2016, 85(1): 218-227.
- [2] PAN J, WAN Q, LI J, *et al.* Strain values of left ventricular segments reduce non-homogeneously in dilated cardiomyopathy with moderately and severely deteriorated heart function assessed by MRI tissue tracking imaging. *Int Heart J*, 2018, 59(6): 1312-1319.
- [3] CLAUS P, OMAR AMS, PEDRIZZETTI G, *et al.* Tissue tracking technology for assessing cardiac mechanics;

- principles, normal values, and clinical applications. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8(12):1444-1460.
- [4] LIU B, DARDEER AM, MOODY WE, *et al.* Normal values for myocardial deformation within the right heart measured by feature-tracking cardiovascular magnetic resonance imaging. *Int J Cardiol*, 2018, 252: 220-223 [2019-02-07]. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2017.10.106>.
- [5] MACEIRA AM, TUSET-SANCHIS L, LOPEZ-GARRIDO M, *et al.* Feasibility and reproducibility of feature-tracking-based strain and strain rate measures of the left ventricle in different diseases and genders. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 47(5):1415-1425.
- [6] SCHMIDT B, DICK A, TREUTLEIN M, *et al.* Intra- and inter-observer reproducibility of global and regional magnetic resonance feature tracking derived strain parameters of the left and right ventricle. *Eur J Radiol*, 2017, 89: 97-105 [2019-02-07]. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2017.01.025>.
- [7] DOERNER J, BUNCK AC, MICHELS G, *et al.* Incremental value of cardiovascular magnetic resonance feature tracking derived atrial and ventricular strain parameters in a comprehensive approach for the diagnosis of acute myocarditis. *Eur J Radiol*, 2018, 104:120-128 [2019-02-07]. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.05.012>.
- [8] ZHU T, ZENG W, CHEN Y, *et al.* 2D/3D CMR tissue tracking versus CMR tagging in the assessment of spontaneous T2DM rhesus monkeys with isolated diastolic dysfunction. *BMC Med Imaging*, 2018, 18(1): 47 [2019-02-07]. <https://doi.org/10.1186/s12880-018-0288-y>.
- [9] LUETKENS JA, PETRY P, KUETTING D, *et al.* Left and right ventricular strain in the course of acute myocarditis: a cardiovascular magnetic resonance study. *Rofo*, 2018, 190(8):722-732.
- [10] LV S, LU C, LI M, *et al.* The dynamic changes in myocardial collagen metabolism in experimental autoimmune myocarditis rats. *Hellenic J Cardiol*, 2018, 59(4):234-237.
- [11] MAZURKIEWICZ L, PETRYKA J, SPIEWAK M, *et al.* Biventricular mechanics in prediction of severe myocardial fibrosis in patients with dilated cardiomyopathy: CMR study. *Eur J Radiol*, 2017, 91:71-81 [2019-02-07]. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2017.03.019>.
- [12] KANSAL MM, MANSOUR IN, ISMAIL S, *et al.* Left ventricular global longitudinal strain predicts mortality and heart failure admissions in African American patients. *Clin Cardiol*, 2017, 40(5):314-321.
- [13] SENGUPTA PP, TAJIK AJ, CHANDRASEKARAN K, *et al.* Twist mechanics of the left ventricle: principles and application. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2008, 1(3):366-376.
- [14] HO SY. Anatomy and myoarchitecture of the left ventricular wall in normal and in disease. *Eur J Echocardiogr*, 2009, 10(8):iii3-iii7.
- [15] KHAN JN, SINGH A, NAZIR SA, *et al.* Comparison of cardiovascular magnetic resonance feature tracking and tagging for the assessment of left ventricular systolic strain in acute myocardial infarction. *Eur J Radiol*, 2015, 84(5):840-848.
- [16] PEDRIZZETTI G, CLAUS P, KILNER PJ, *et al.* Principles of cardiovascular magnetic resonance feature tracking and echocardiographic speckle tracking for informed clinical use. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18(1): 51 [2019-02-07]. <https://doi.org/10.1186/s12968-016-0269-7>.
- [17] LIU B, DARDEER AM, MOODY WE, *et al.* Reference ranges for three-dimensional feature tracking cardiac magnetic resonance: comparison with two-dimensional methodology and relevance of age and gender. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2018, 34(5):761-775.

(2019-04-27 收稿, 2019-05-19 修回)

编辑 吕 熙