

· 心脏影像学专栏 ·

基于 CMR 形变配准算法技术定量孤立性左室
心肌致密化不全心肌应变的初步研究刘佳^{1,2} 崔越^{1,2} 曹玉坤^{1,2} 宋晶^{1,2} 周晶月³ 史河水^{1,2}

[摘要] 目的:探究应用心脏磁共振形变配准算法(CMR-DRA)技术定量评估孤立性左室心肌致密化不全(iLVNC)患者心肌形变的价值。方法:对27例iLVNC患者(iLVNC组)及30例健康志愿者(对照组)行1.5T心脏磁共振检查,将短轴电影导入DRA应力分析软件,半自动计算整体和节段性左室收缩峰值径向应力(E_{rr})、周向应力(E_{cc})、纵向应力(E_{ll})及收缩期、舒张早期、舒张晚期应力率。结果:iLVNC组的整体E_{ll}、E_{rr}和E_{cc}值均低于对照组[E_{ll}:(-11.0±3.8)%:(-14.3±1.8)%;E_{rr}:(24.7±9.3)%:(38.5±6.1)%;E_{cc}:(-12.1±4.9)%:(-16.6±1.4)%;P<0.01];iLVNC组左室射血分数(LVEF)、每搏输出量指数(SVI)及心指数(CI)值均低于对照组[LVEF:(42.6±14.9)%:(57.5±4.9)%;SVI:(28.1±8.9)ml·m⁻²:(41.2±8.1)ml·m⁻²;CI:(1.8±0.6)L·min⁻¹·m⁻²:(2.6±0.5)L·min⁻¹·m⁻²;P<0.01];iLVNC组的LVEF≥50%组E_{rr}值低于对照组[(31.8±3.6)%:(38.5±6.1)%;P<0.05];左室16节段E_{rr}值均低于对照组(P<0.05),间壁基底段、下侧壁基底段E_{cc}值与对照组无明显统计学差异,其余14个节段E_{cc}值均低于对照组(P<0.05),游离壁心尖段及中间段、间隔壁中间段E_{ll}值均低于对照组(P<0.05)。心功能及形变参数与非致密节段数目(NoNC)均无明显相关性(P>0.05)。结论:CMR-DRA技术能够定量评估iLVNC患者的左室心肌形变特征,并且径向应力能够较LVEF更敏感地检测到心肌功能的受损。

[关键词] 心脏磁共振成像;孤立性左室心肌致密化不全;形变配准算法;心肌形变

doi:10.13201/j.issn.1001-1439.2018.12.005

[中图分类号] R542.2 [文献标志码] A

Quantitation of myocardial deformation in patients with isolated left ventricular non-compaction based on cardiovascular magnetic resonance deformation registration algorithm: a preliminary study

LIU Jia^{1,2} CUI Yue^{1,2} CAO Yukun^{1,2} SONG Jing^{1,2} ZHOU Xiaoyue³ SHI Heshui^{1,2}

(¹Department of Radiology, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430022, China; ²Hubei Province Key Laboratory of Molecular Imaging; ³MR Collaboration, Siemens Healthcare Ltd.)

Corresponding author: SHI Heshui, E-mail: heshuishi@hust.edu.cn

Abstract Objective: To explore the value of cardiovascular magnetic resonance based on deformation registration algorithm (DRA) in quantitation of myocardium deformation in patients with isolated left ventricular non-compaction (iLVNC). **Method:** We recruited 27 iLVNC patients (iLVNC group) and 30 healthy volunteers to undergo cardiovascular magnetic resonance on a 1.5T MR scanner. Myocardial deformation analysis was performed after cardiac cine data were imported into the strain analysis software based on DRA technique. Global and segmental strain of radial, circumferential and longitudinal direction and strain rate of systolic, early-diastole and late-diastole were semi-automatically calculated. **Result:** The global E_{ll}, E_{rr} and E_{cc} value were lower in iLVNC group than those in control group [E_{ll}:(-11.0±3.8)% vs. (-14.3±1.8)%; E_{rr}:(24.7±9.3)% vs. (38.5±6.1)%; E_{cc}:(-12.1±4.9)% vs. (-16.6±1.4)%; P<0.01 for all]. Left ventricular ejection fraction (LVEF), stroke volume index (SVI) and cardiac index (CI) value were lower in iLVNC group than those in control group [LVEF:(42.6±14.9)% vs. (57.5±4.9)%; SVI:(28.1±8.9)ml·m⁻² vs. (41.2±8.1)ml·m⁻²; CI:(1.8±0.6)L·min⁻¹·m⁻² vs. (2.6±0.5)L·min⁻¹·m⁻²; P<0.01 for all]. Err value in EF≥50% group was lower than that in control group [(31.8±3.6)% vs. (38.5±6.1)%; P<0.05]. Err values in all the 16 segments were lower than those

¹华中科技大学同济医学院附属协和医院放射科(武汉,430022)

²分子影像湖北省重点实验室

³西门子医疗系统有限公司

通信作者:史河水, E-mail: heshuishi@hust.edu.cn

in control group ($P < 0.05$ for all). No significant differences of Ecc values in the basal septum and basal inferoseptal segments were found between iLVNC group and control group ($P > 0.05$), and the other 14 segments in iLVNC group were lower than those in control group ($P < 0.05$ for all). Ell values in apical segment and middle segment of the free wall, and in middle segment of the septal wall were lower than those in control group ($P < 0.05$ for all). All cardiac function and myocardial deformation parameters had no significant correlation with the number of non-compacted segment (NoNC) ($P > 0.05$ for all). **Conclusion:** CMR-DRA technique is conducive to quantitative evaluate myocardial deformation in patients with iLVNC, and myocardial deformation permits earlier detection of LV functional impairment.

Key words cardiovascular magnetic resonance imaging; isolated left ventricular non-compaction; deformation registration algorithm; myocardial deformation

左室心肌致密化不全(left ventricular non-compaction, LVNC)是一种罕见的心肌疾病,其特征表现为显著增粗的小梁、变薄的致密层以及与心室腔相通的小梁间隐窝,发病机制目前尚未明确,可能与心内膜和心肌的正常胚胎发生停滞有关^[1]。2006年美国心脏协会将LVNC归类为原发性心脏病内的遗传性心肌病^[2],2008年欧洲心脏病协会将其归类为未分型心肌病^[3]。这类患者通常无症状,但可因心力衰竭、血栓栓塞或心律失常而复杂化,甚至发生心源性猝死。根据是否伴有其他心脏疾病, LVNC可分为孤立性左室心肌致密化不全(isolated left ventricular non-compaction, iLVNC)和非孤立性左室心肌致密化不全^[4]。

心脏磁共振(CMR)由于软组织分辨率高,能够较超声更加清晰、直观地显示非致密层心肌的网状结构,并且可以提供精确、可重复性高的心功能信息,能够检测心肌纤维化也是它的一个优势。近年来,CMR心肌形变技术被用于评价整体或局部心肌的功能,并可对疾病预后进行评估^[5]。形变配准算法(deformation registration algorithm, DRA)是一种基于像素的应变分析工具,与磁共振特征追踪技术相比有更好的重复性,并且与超声斑点追踪技术相关性较好,基于CMR-DRA的心肌形变分析已经被应用于描述整体和局部的心肌形变^[6-7]。本研究旨在应用CMR-DRA技术定量评估iLVNC患者的心肌形变,并与正常志愿者进行对照分析。

1 对象与方法

1.1 对象

回顾性分析2015-01—2018-04在我院经CMR确诊的27例iLVNC患者(iLVNC组)资料,其中男19例,女8例,年龄18~68岁,平均 (36.9 ± 13.8) 岁,左室致密化不全的磁共振诊断标准参考的是Petersen 2005年提出的标准^[8],即左室舒张末期长轴层面非致密心肌(NC)厚度/致密心肌(C)厚度 ≥ 2.3 。

排除标准为:①年龄小于18岁;②合并心肌炎、冠心病、中至重度的心脏瓣膜关闭不全及其他先天性或获得性心脏病。

征集30名健康志愿者(对照组)行CMR扫描,

其中男20例,女10例,年龄21~65岁,平均 (36.9 ± 14.1) 岁。所有志愿者均无心血管相关疾病及心肌致密化不全家族史。本研究经华中科技大学同济医学院伦理委员会批准。所有参与者行心脏磁共振扫描前签署知情同意书。

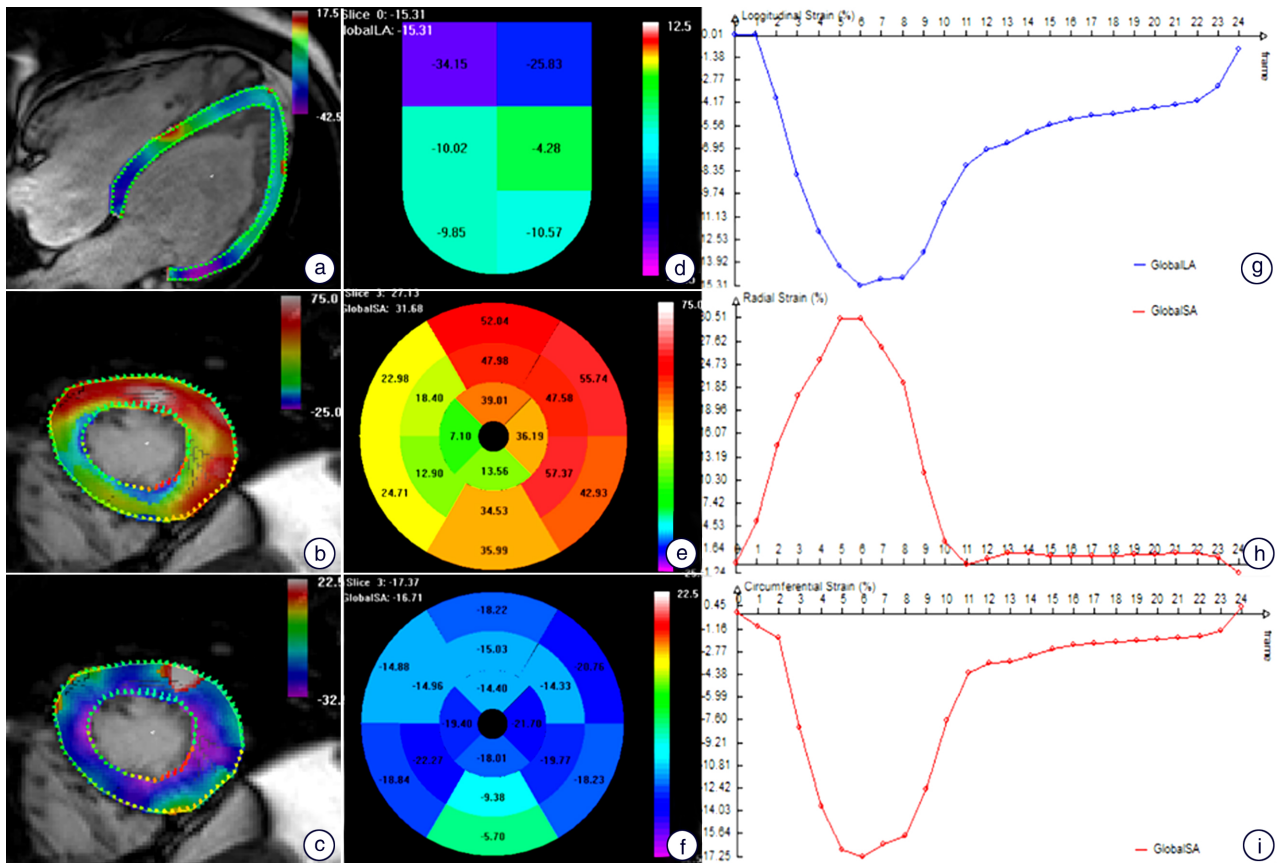
1.2 仪器与方法

CMR检查采用1.5T磁共振(MAGNETOM Aera, Siemens Healthineers, Erlangen, Germany)扫描。采用相控阵心脏线圈以及无线矢量心电图,扫描前训练受检者深吸气后屏气,保证扫描不受呼吸和心跳干扰。采用平衡稳态自由进动序列(balanced steady state free precession, bSSFP),扫描获得左心室短轴及二、三、四腔长轴电影图像。扫描参数如下:重复时间(TR)=2.9 ms、回波时间(TE)=1.2 ms、视野(FOV)= 360×270 mm²、翻转角(flip angle)=80°、矩阵=186×256,层厚=6 mm。

1.3 评价指标

1.3.1 心功能分析 将左室短轴位电影图像传至西门子工作站进行心功能分析(Argus, Siemens Healthineers)。在连续的短轴电影图像上手动勾画心内膜、心外膜轮廓,获得左室心功能参数,包括左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、舒张末期容积指数(end diastolic volume index, LVEDVI)、收缩末期容积指数(end systolic volume index, ESVI)、每搏输出量指数(stroke volume index, SVI)、左室心肌质量指数(left ventricular mass index, LVMI)及心指数(cardiac index, CI)。

1.3.2 心肌形变分析 采用西门子公司DRA心肌应变分析软件(Trufi Strain, Version. 2.0)进行所有的应变和应变率分析。从左室短轴电影图像测量周向和径向应变,纵向长轴电影图像测量纵向应变,对于左室各节段的应变和应变率分析采用AHA16段模型进行分析(图1)。主要参数如下:短轴径向应变(radial strain, Err)和应变率(radial strain rate, SRrr),周向应变(circumferential strain, Ecc)和应变率(circumferential strain rate, SRcc),长轴纵向应变(longitudinal strain, Ell)和应



a、b、c 分别为纵向、径向、周向应力组织追踪分析轮廓；d、e、f 分别为纵向、径向、周向应力 16 节段的牛眼图定量值；g、h、i 分别为一个心动周期纵向、径向、周向的时间-应力曲线。

图 1 左室心肌收缩峰值应力值测量示意图

Figure 1 Measurement diagram of the peak systolic strain value of the left ventricular myocardium

变率(longitudinal strain rate, SRll)。

1.4 统计学处理

采用 SPSS 22.0 统计分析软件,连续变量以 $\bar{x} \pm s$ 表示,两组数据比较采用 *t* 检验或 Mann-Whitney U 检验。iLVNC 组形变参数与一般临床指标及心功能参数间的相关性采用 Pearson 相关分析。将 iLVNC 组进一步分为 LVEF \geq 50%组(10 例)和 LVEF<50%组(17 例),与对照组(30 例)两两比较,采用非参数检验($P < 0.05$ 为差异有统计学意义, P 值经 Bonferroni 校正)。

1.5 重复性检验

在健康对照组中随机抽取 10 例图像,由两名有经验的观察者独立进行短轴及长轴应力分析,其中一名观察者在 14 d 后再进行一次分析,分别计算观察者内和观察者间各参数的重复性,采用组间相关系数(inter-class correlation coefficient, ICC), $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般临床指标及心功能、形变参数

iLVNC 组与对照组的一般临床指标和 CMR 相关测量指标结果见表 1。iLVNC 组 LVEF、SVI 及 CI 值较对照组减低,差异有统计学意义($P <$

0.01);iLVNC 组 Ell、Err 及 Ecc 值较对照组减低,差异有统计学意义($P < 0.01$);收缩期 SRll、舒张晚期 SRll、收缩期 SRrr、舒张早期 SRrr、舒张晚期 SRrr、收缩期 SRcc、舒张早期 SRcc 较对照组减低,差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.2 LVEF \geq 50%组、LVEF<50%与对照组应力值的比较

Err 值在 LVEF \geq 50%与对照组间有统计学差异($P < 0.05$),其余形变参数在 LVEF \geq 50%与对照组间均无明显统计学差异($P > 0.05$)(表 2)。

2.3 致密化不全心肌分布及节段应力分析

27 例患者 432 个心肌节段中,心肌致密化不全累及 109 段,平均每例患者受累节段数为 4.0 ± 2.3 ,其中 93%的患者心尖段侧壁受累,基底段受累最少,游离壁较间隔壁易受累(图 2)。

iLVNC 组 16 个节段 Err 值较对照组减低,差异有统计学意义($P < 0.05$),iLVNC 组间壁基底段、下侧壁基底段的 Ecc 值较对照组无明显减低($P > 0.05$),其余 14 个节段 Ecc 值较对照组减低,差异有统计学意义(表 3);iLVNC 组游离壁心尖段及中间段、间隔壁中间段 Ell 值较对照组减低,差异有统计学意义($P < 0.05$)(表 4)。

表 1 一般指标、心功能参数及心肌形变参数

Table 1 General index, cardiac function parameters and deformation parameters

$\bar{x} \pm s$

参数	iLVNC 组(27 例)	对照组(30 例)	P 值
年龄/岁	36.9±13.8	36.9±14.1	0.755
男/例(%)	19(70.4%)	20(66.7%)	0.769
BMI	23.3±3.9	21.9±2.4	0.135
心率/(次·min ⁻¹)	66.3±8.6	63.6±9.0	0.127
LVEF/%	42.6±14.9	57.5±4.9	<0.01
EDVI/(ml·m ⁻²)	73.9±37.2	72.5±14.5	0.167
ESVI/(ml·m ⁻²)	45.8±37.5	31.4±8.0	0.234
SVI/(ml·m ⁻²)	28.1±8.9	41.2±8.1	<0.01
LVMI/(g·m ⁻²)	64.9±26.2	63.7±9.5	0.133
CI/(L·min ⁻¹ ·m ⁻²)	1.8±0.6	2.6±0.5	<0.01
EII/%	-11.0±3.8	-14.3±1.8	<0.01
Err/%	24.7±9.3	38.5±6.1	<0.01
Ecc/%	-12.1±4.9	-16.6±1.4	<0.01
收缩期 SRll/(s ⁻¹)	-55.3±18.0	-73.5±13.1	<0.01
舒张早期 SRll/(s ⁻¹)	24.9±46.5	46.8±44.8	0.064
舒张晚期 SRll/(s ⁻¹)	40.4±19.2	52.5±19.3	<0.05
收缩期 SRrr/(s ⁻¹)	112.9±48.3	176.5±39.7	<0.01
舒张早期 SRrr/(s ⁻¹)	-126.3±90.4	-185.8±85.6	<0.01
舒张晚期 SRrr/(s ⁻¹)	-42.8±50.4	-73.2±59.3	<0.01
收缩期 SRcc/(s ⁻¹)	-72.5±31.6	-91.6±14.2	<0.05
舒张早期 SRcc/(s ⁻¹)	52.0±40.1	84.3±22.3	<0.01
舒张晚期 SRcc/(s ⁻¹)	31.9±28.9	54.7±90.1	0.071
受累节段数(/NoNC)	4.0±2.3	—	—

表 2 按 EF 值分组后 3 组间应力值的比较

Table 2 Comparison of strain among EF≥50% group, EF<50% group and control group $\bar{x} \pm s$

参数	iLVNC 组		对照组 (30 例)	P 值
	LVEF≥50% (10 例)	LVEF<50% (17 例)		
EII	-14.5±1.9	-9.0±3.2 ¹⁾	-14.3±1.8	<0.01
Err	31.8±3.6 ¹⁾	20.6±9.2 ¹⁾	38.5±6.1	<0.01
Ecc	-16.6±1.5	-9.4±4.1 ¹⁾	-16.6±1.4	<0.01

与对照组比较,¹⁾P<0.05。

2.4 相关性分析

EII 与 LVEF 值间呈显著相关性($r=0.915, P<0.01$);Err 与 ESVI、LVEF 值间呈显著相关性($r=0.710, 0.907, P<0.01$);Ecc 与 LVMI、LVEF 值间呈显著相关性($r=0.710, 0.932, P<0.01$);收缩期 SRll 与年龄、ESVI、LVMI 及 LVEF 值间呈显著相关性($r=0.702, 0.702, 0.741, 0.915, P<0.01$);收缩期 SRrr 与 LVEF 值间呈显著相关性($r=0.814, P<0.01$);收缩期 SRcc 与 LVEF 值间呈显著相关性($r=0.795, P<0.01$)。心功能及形变各参数与 NoNC 均无明显相关性($P>0.05$)。

2.5 可重复性分析

观察者内 EII、Err、Ecc 值的组间相关系数分别

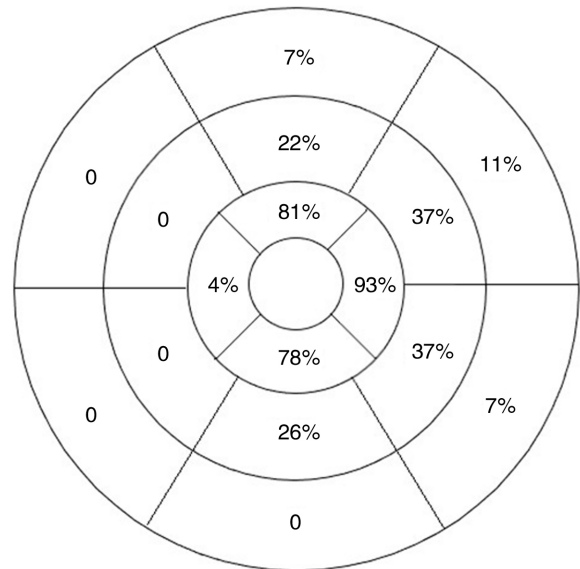


图 2 iLVNC 组 109 个受累节段的分布情况及百分比

Figure 2 Distribution and percentage of the 109 segments involved in iLVNC group

为 0.946、0.978、0.862, 观察者间组间相关系数分别为 0.955、0.952、0.843。

3 讨论

LVNC 由于心肌结构发生了改变,室壁顺应性减低、僵硬增加,进而导致心室舒缩功能障碍,可

表 3 iLVNC 组和对照组左室短轴的各节段 Err 和 Ecc 值
 Table 3 Err and Ecc values of per segment derived from the short-axis % , $\bar{x} \pm s$

节段	Err			Ecc		
	iLVNC 组(27 例)	对照组(30 例)	P 值	iLVNC 组(27 例)	对照组(30 例)	P 值
1	32.7±16.5	53.2±16.9	<0.01	-13.7±6.3	-17.7±2.2	<0.01
2	12.6±12.2	22.8±5.3	<0.01	-11.5±7.1	-15.6±2.0	<0.05
3	13.9±9.6	19.0±5.8	<0.05	-15.2±5.6	-19.6±2.6	<0.01
4	28.4±13.3	36.7±10.3	<0.05	-8.1±7.0	-9.8±4.4	0.379
5	34.0±15.4	48.4±11.1	<0.01	-14.6±6.3	-18.6±3.1	<0.01
6	33.4±12.2	48.2±10.4	<0.01	-14.5±5.1	-16.6±2.6	0.250
7	31.4±12.4	52.5±11.7	<0.01	-9.4±8.6	-14.8±2.9	<0.01
8	16.3±13.4	29.3±8.7	<0.01	-7.5±10.1	-14.3±2.5	<0.01
9	18.0±10.6	23.4±7.7	<0.01	-14.7±5.9	-19.8±2.5	<0.01
10	29.1±14.5	41.3±12.3	<0.01	-9.7±6.6	-13.5±2.7	<0.01
11	40.9±19.0	61.1±13.4	<0.01	-12.6±7.4	-17.5±3.3	<0.01
12	37.1±15.1	53.3±10.7	<0.01	-11.3±5.8	-15.3±2.8	<0.01
13	32.7±11.9	50.2±11.5	<0.01	-11.9±8.1	-15.8±2.6	<0.05
14	12.5±13.6	23.0±10.2	<0.01	-12.5±6.6	-17.5±3.9	<0.01
15	21.7±13.3	36.0±9.7	<0.01	-15.4±6.2	-22.2±3.3	<0.01
16	38.5±16.2	57.9±12.3	<0.01	-15.4±5.7	-22.3±3.7	<0.01

表 4 iLVNC 组和对照组左室长轴的游离壁和间隔壁 EII 值

Table 4 EII values of lateral wall and septal wall derived from the long-axis % , $\bar{x} \pm s$

部位	iLVNC 组(27 例)	对照组(30 例)	P 值
基底间隔壁	-18.2±6.5	-19.8±3.9	0.25
基底游离壁	-20.8±7.1	-22.7±5.9	0.273
中部间隔壁	-5.3±7.2	-9.3±3.7	<0.05
中部游离壁	-9.1±5.7	-13.4±5.0	<0.01
心尖间隔壁	-10.3±5.8	-12.6±4.4	0.096
心尖游离壁	-8.8±3.8	-13.8±3.5	<0.01

出现心律失常、体循环栓塞及心力衰竭(心衰)等临床表现。有文献报道,约 2/3 的 iLVNC 患者在疾病进程中可发生心衰^[9],因此及早诊断并监测心功能显得尤为重要。在 CMR 电影序列上,iLVNC 患者的左室壁运动可表现正常,也可出现节段性收缩或舒张运动减弱,亦可两者同时存在。CMR 图像通过后处理可获得 LVEF 值。本项研究中,iLVNC 组 LVEF 值较对照组减低,表明左室收缩功能已经受损,这可能与冠脉微缺血有关。先前有研究^[10]使用正电子发射计算机断层扫描证实了 iLVNC 患者的心肌灌注受损和冠脉血流储备减少。

近年有研究提出,心肌形变能够早期发现心肌功能的受损^[11],并且能够预测心血管不良事件^[12]。Wang 等^[13]对肥厚性心肌病进行应力分析,发现 DRA 技术较传统特征追踪技术更为稳健,且对全局应力分析的可重复性更好。此前有文献指出^[14],LVEF<50%表明有资格接受药物治疗,<30%表

明可能有资格植入除颤器,因此本项研究进一步将 iLVNC 组分为 LVEF≥50%和 LVEF<50%两组,分析应力指标发现 EF≥50%组 Err 值较对照组减低(P<0.05),说明 Err 较 EF 值对左心功能受损更为敏感。此前有超声文献提出^[15],EII 较 LVEF 值能更敏感地检测出左室收缩功能受损。不同研究结果的差异可能与影像学手段、形变分析技术及后处理软件不一致等因素有关。此外本项研究病例数较少,也可能存在一定误差。但是无论 CMR 还是超声,都是基于形态学的诊断手段,对心肌致密不全的疾病进展及心功能评价受限,相比 LVEF,心肌形变能够早期提供更微观的信息,帮助我们发现疾病早期心功能的变化。

本项研究显示,在 109 个受累节段中,心尖段较中间段及基底段易受累,游离壁较间隔壁易受累,这是由于正常人心肌致密化是一个从心外膜到心内膜、基底部到心尖部、室间隔到游离壁的过程,当出现基因缺陷等情况使得致密化过程受阻时,则会出现上述受累特点^[1]。同时,本项研究对左室各个节段的应力进行了分析,发现心脏应力的减低并不局限于受累节段,无明显受累节段的应力也是降低的,这与之前的研究结果一致^[16]。这说明心脏功能受损是区域性的心肌功能受损,随疾病进展后导致心室整体的收缩甚至舒张功能障碍。关于心功能受损程度是否与心肌致密化不全程度有关,多项研究给出了不同的结果^[17-18]。本项研究中,受累节段数目与形变参数及射血分数均不存在显著相关性。

此外有文献提出^[19-20],舒张早期应变率是舒

张功能障碍的早期敏感指标,能够提供左室心肌松弛性和间质纤维化的重要信息,并且舒张期应力率的测定能够帮助预示心衰事件的发生,具有预后意义。本项研究中,iLVNC 组 SR_{rr}、SR_{cc} 值较对照组减低,提示舒张功能已经受损。

本项研究存在一些局限性,首先样本量较少,其次,本研究纳入 iLVNC 组的患者均为成年人,且年龄为 36.9 ± 13.8 岁,并未覆盖所有年龄层次的患者。

综上所述,本项研究发现 CMR-DRA 技术能够定量评估 iLVNC 患者的心肌功能,并且心肌形变能够早期检测到心功能的受损,有望应用于临床监测心肌致密化不全疾病进展及一定程度上指导决策。

参考文献

- [1] Towbin JA, Lorts A, Jefferies JL. Left ventricular non-compaction cardiomyopathy[J]. *Lancet*, 2015, 386(9995):813-825.
- [2] Maron BJ, Towbin JA, Thiene G, et al. Contemporary definitions and classification of the cardiomyopathies [J]. *Circulation*, 2006, 113(14):1807-1816.
- [3] Elliott P, Andersson B, Arbustini E, et al. Classification of the cardiomyopathies: a position statement from the European Society Of Cardiology Working Group on Myocardial and Pericardial Diseases[J]. *Eur Heart J*, 2008, 29(2):270-276.
- [4] Finsterer J. Cardiogenetics, neurogenetics, and pathogenetics of left ventricular hypertrabeculation/non-compaction[J]. *Pediatr Cardiol*, 2009, 30(5):659-681.
- [5] 史河水,曹玉坤. 磁共振评价左室心肌应变技术及其临床应用的研究进展[J]. *临床心血管病杂志*, 2017, 33(12):1135-1139.
- [6] Lamacie MM, Thavendiranathan P, Hanneman K, et al. Quantification of global myocardial function by cine MRI deformable registration-based analysis: Comparison with MR feature tracking and speckle-tracking echocardiography[J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(4):1404-1415.
- [7] Lin K, Collins JD, Chowdhary V, et al. Heart deformation analysis for automated quantification of cardiac function and regional myocardial motion patterns: A proof of concept study in patients with cardiomyopathy and healthy subjects[J]. *Eur J Radiol*, 2016, 85(10):1811-1817.
- [8] Petersen SE, Selvanayagam JB, Wiesmann F, et al. Left ventricular non-compaction: insights from cardiovascular magnetic resonance imaging[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2005, 46(1):101-105.
- [9] Oechslin EN, Attenhofer JC, Rojas JR, et al. Long-term follow-up of 34 adults with isolated left ventricular noncompaction: a distinct cardiomyopathy with poor prognosis[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2000, 36(2):493-500.
- [10] Gao XJ, Li Y, Kang LM, et al. Abnormalities of myocardial perfusion and glucose metabolism in patients with isolated left ventricular non-compaction[J]. *J Nucl Cardiol*, 2014, 21(3):633-642.
- [11] Nucifora G, Sree Raman K, Muser D, et al. Cardiac magnetic resonance evaluation of left ventricular functional, morphological, and structural features in children and adolescents vs. young adults with isolated left ventricular non-compaction [J]. *Int J Cardiol*, 2017, 246(1):68-73.
- [12] Zhang KW, French B, May KA, et al. Strain improves risk prediction beyond ejection fraction in chronic systolic heart failure[J]. *J Am Heart Assoc*, 2014, 3(1):e550.
- [13] Wang J, Li W, Sun J, et al. Improved segmental myocardial strain reproducibility using deformable registration algorithms compared with feature tracking cardiac MRI and speckle tracking echocardiography[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(2):404-414.
- [14] Jessup M, Abraham WT, Casey DE, et al. 2009 focused update: ACCF/AHA Guidelines for the Diagnosis and Management of Heart Failure in Adults [J]. *Circulation*, 2009, 119(14):1977-2016.
- [15] Smiseth OA, Torp H, Opdahl A, et al. Myocardial strain imaging: how useful is it in clinical decision making? [J]. *Eur Heart J*, 2016, 37(15):1196-1207.
- [16] Kalapos A, Domsik P, Forster T, et al. Left ventricular strain reduction is not confined to the noncompacted segments in noncompaction cardiomyopathy-insights from the three-dimensional speckle tracking echocardiographic MAGYAR-Path Study [J]. *Echocardiography*, 2014, 31(5):638-643.
- [17] Dellegrottaglie S, Pedrotti P, Roghi A, et al. Regional and global ventricular systolic function in isolated ventricular non-compaction [J]. *Int J Cardiol*, 2012, 158(3):394-399.
- [18] Huttin O, Venner C, Frikha Z, et al. Myocardial deformation pattern in left ventricular non-compaction: Comparison with dilated cardiomyopathy [J]. *Int J Cardiol Heart Vasc*, 2014, 5(1):9-14.
- [19] Park TH, Nagueh SF, Khoury DS, et al. Impact of myocardial structure and function postinfarction on diastolic strain measurements: implications for assessment of myocardial viability[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2006, 290(2):H724-H731.
- [20] Taylor RJ, Moody WE, Umar F, et al. Myocardial strain measurement with feature-tracking cardiovascular magnetic resonance: normal values[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(8):871-881.

(收稿日期:2018-09-03)