

血流向量成像技术评价肥厚型心肌病患者左室功能的初步研究

杨艳 薛丹 杨一林 王鹏 张宇新 袁丽君 段云友

摘要 目的 应用血流向量成像(VFM)技术观察肥厚型心肌病(HCM)患者左室收缩期及舒张期能量损耗和循环变化,评价其左室收缩及舒张功能。方法 选取 26 例非梗阻性 HCM 患者(HCM 组)和 36 例健康志愿者(对照组),分别在标准心尖四腔、三腔及两腔观提取收缩早期、收缩中期、收缩晚期、舒张早期、舒张中期及左房收缩期 6 个时相的循环参数(涡旋数量、涡旋面积、循环强度)和基底段、中间段、心尖段平均能量损耗(EL)的参数,比较两组上述各参数变化。应用双多普勒同步取样技术获取二尖瓣口舒张早期血流峰值速度(E)、二尖瓣口舒张晚期血流峰值速度(A)、二尖瓣口舒张早期血流速度与室间隔侧二尖瓣环舒张早期运动峰值速度之比(E/e)、Tei 指数及心指数,并将其分别与各时相循环和能量损耗参数进行相关性分析。结果 HCM 组与对照组在舒张早期心尖段、左房收缩期中间段、收缩早期基底段,以及收缩中、晚期基底段、中间段、心尖段的 EL 比较,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$);两组 EL 在各个时相从基底段到心尖段依次减低,差异均有统计学意义(均 $P < 0.01$)。两组在舒张早期涡旋数量和舒张中期涡旋数量、涡旋面积、循环强度比较,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$);两组在收缩早期、收缩中期仅涡旋面积差异有统计学意义($P < 0.05$)。舒张早期循环强度与 E 呈正相关($r = 0.456, P < 0.01$);左房收缩期循环强度与 A 呈正相关($r = 0.485, P < 0.01$);收缩中期基底段 EL 与心指数呈负相关($r = -0.363, P < 0.01$);左房收缩期基底段、中间段 EL 与 E/e 均呈正相关($r = 0.310, P < 0.05; r = 0.444, P < 0.01$)。结论 VFM 技术能量损耗和循环参数对于早期发现心功能异常更加敏感,可作为评价心脏早期功能变化的新指标。

关键词 血流向量成像技术;超声心动描记术;肥厚型心肌病;能量损耗;循环;心室功能,左
[中图分类号]R542.2;R540.45 [文献标识码]A

Preliminary evaluation of left ventricular function in hypertrophic cardiomyopathy by vector flow mapping

YANG Yan, XUE Dan, YANG Yilin, WANG Peng, ZHANG Yuxin, YUAN Lijun, DUAN Yunyou

Department of Ultrasound Diagnostics, Tangdu Hospital, Fourth Military Medical University, Xi'an 710038, China

ABSTRACT Objective To observe the change of energy loss and circulation of left ventricular systolic and diastolic periods by vector flow mapping, and evaluate the left ventricular systolic and diastolic function in patients with hypertrophic cardiomyopathy. **Methods** Twenty-six non-obstructive hypertrophic cardiomyopathy patients (HCM group) and thirty-six healthy volunteers (control group) were enrolled. The quantitative parameters, including average energy loss (EL-base, EL-mid, EL-apex) and circulation (vortex quantity, vortex area, circulation) were measured in the different periods of vector flow mapping imaging mode in an apical four-chamber view, apical three-chamber view and apical two-chamber view, respectively. The difference of parameters were evaluated between two groups during early systole, mid-systole, late-systole, early diastole, mid-diastole and atrial contraction period. The early transmitral valve blood flow velocity E, the late transmitral valve blood flow velocity A, the ratio of early transmitral valve blood flow velocity to the early diastolic mitral valve velocity E/e and Tei index were obtained via dual-Doppler imaging technology. Meanwhile, relationship was analyzed between two groups parameters including average energy loss and circulation and E, A, E/e and Tei index, respectively. **Results** EL-apex during early diastole, EL-mid during left atrial contraction period, EL-base during early systole and all segments during mid-systole and late-systole were different between two groups (all $P < 0.05$). EL decreased gradually from the basal to the apical portion between two groups during six periods that mentioned above (all $P < 0.01$). The vortex quantity during early diastole and the vortex quantity, vortex area and circulation during

mid-diastole were different between two groups (all $P < 0.05$). The vortex area during early systole and mid-systole were different between two groups ($P < 0.05$); The circulation had positive correlation with E during early diastole for all subjects ($r = 0.456, P < 0.01$). The circulation had positive correlation with A during left atrial contraction period for all subjects ($r = 0.485, P < 0.01$). EL-base during mid-systole were negatively correlated with cardiac index for all subjects ($r = -0.363, P < 0.01$). At the basal and mid segment of atrial contraction period, there were positive correlation between EL and E/e ($r = 0.310, P < 0.05; r = 0.444, P < 0.01$). **Conclusion** Vector flow mapping energy loss and circulation parameters can serve as new indexes in evaluating early cardiac function.

KEY WORDS Vector flow mapping; Echocardiography; Hypertrophic cardiomyopathy; Energy loss; Circulation; Ventricular function, left

肥厚型心肌病(HCM)是一种常染色体显性遗传性心肌病,我国 HCM 的患病率超过 1.6%^[1],表现为心肌不对称肥厚,细胞排列紊乱,间质纤维化及心功能降低。HCM 患者早期室壁顺应性下降,舒张受限,而收缩处于高动力状态,收缩功能通过传统的左室射血分数评价表现为正常,然而此时可能已经存在隐匿的收缩功能异常^[2],因此对其左室功能进行早期定量评价具有重要的意义。本研究应用血流向量成像(VFM)技术探讨非梗阻性 HCM 患者左室收缩及舒张各期循环和能量损耗的变化,旨在评价左室收缩及舒张功能。

资料与方法

一、研究对象

选取 2015 年 8 月至 2016 年 4 月我院确诊为非梗阻性 HCM 患者 26 例(HCM 组),其中男 15 例,女 11 例,年龄 20~73 岁,平均(53.35±14.19)岁。入选标准:均符合 2014 年欧洲心脏病学会 HCM 诊断指南^[3]。排除标准:结合临床症状体征并排除其他特异性(继发性)心肌病和地方性心肌病。另选取本院健康体检志愿者 36 例为对照组,其中男 12 例,女 24 例,年龄 21~74 岁,平均(47.33±11.42)岁;经心电图、超声心动图及实验室检查均正常。

二、仪器与方法

1.仪器:使用日立 Prosound F 75 彩色多普勒超声诊断仪,UST-52105 探头,频率 1~5 MHz;配备 DSA-RSI 工作站。

2.方法:受检查者静息 15 min 以上,取左侧卧位,连接同步体表心电图。将探头置于左室心尖处,常规超声心动图采集左室的 CDFI 图像,尽可能将左心长轴置于图像中央,调节扫描深度至图像完整包含左室为止。然后将采集条件预设为 VFM 条件,使取样框及二维图像宽度恰好完整包含左室,分别在标准心尖四腔、三腔及两腔观采集 3 个完整心动周期的 CDFI 实时图像。启动双多普勒同步取样技术,在标准心尖四腔观上

开启脉冲波多普勒/组织多普勒模式,将 PW 取样容积置于舒张期二尖瓣瓣尖水平的二尖瓣口处,TDI 取样容积置于二尖瓣隔瓣根部的室间隔上,同步获取二尖瓣口舒张早期血流峰值速度(E)、二尖瓣口舒张晚期血流峰值速度(A)、E/A、二尖瓣环收缩期运动峰值速度(s)、室间隔侧二尖瓣环舒张早期运动峰值速度(e)、二尖瓣环舒张晚期运动峰值速度(a)、e/a 及 E/e;在标准心尖三腔观上开启 PW/PW 模式,同步获取二尖瓣口前向血流频谱及主动脉瓣口前向血流频谱,测定左室等容收缩时间、等容舒张时间,并计算出左室 Tei 指数。

3.脱机分析图像及数据提取:将采集的声像图导入 DAS-RS1 超声工作站进行 VFM 离线分析,在观察完整心动周期的基础上,以同步体表心电图及二尖瓣口、主动脉瓣口的时间流量曲线为时相确认依据,确定左室收缩早期(等容收缩期)、收缩中期(快速射血期)、收缩晚期(减慢射血期)、舒张早期(快速充盈期)、舒张中期(减慢充盈期)及左房收缩期 6 个观察时相。手动描记心内膜边界,动态追踪左室各时相的心肌运动,定性分析同一心动周期不同时相左室腔内循环及能量损耗变化规律。提取各时相的涡旋数量、涡旋面积、循环强度;将左室分为心尖段、中间段、基底段,提取各时相的平均能量损耗(EL),心尖四腔、三腔及两腔观取平均值。

三、统计学处理

应用 SPSS 19.0 统计软件,定量资料行正态性和方差齐性检验,近似正态分布的定量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示;不同状态同类定量参数采用相应的参数检验或非参数检验。各变量间的相关性分析采用 Spearman 相关分析法;计算组内及组间相关系数;观察者内及观察者间的重复性检验在初步分析 5 d 之后检测。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、两组一般资料和常规超声参数比较

HCM 组体表面积、室间隔及后壁厚度、等容舒张时间、Tei 指数及 E/e 均高于对照组,差异均有统计学

意义(均 $P < 0.05$);舒张末期容积、收缩末期容积、心指数、心输出量、s、e、a 均低于对照组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。两组年龄、体质量指数、心率、等容收缩时间、射血分数、每搏量、E、A 及 E/A 比较,差异均无统计学意义。见表 1。

二、两组循环及能量损耗的变化比较

HCM 组 EL 在舒张早期心尖段、左房收缩期中间段均高于对照组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$);在收缩早期基底段及收缩中、晚期各段 EL 均高于对照组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。两组间 EL 在各个时相从基底段到心尖段均依次减低,差异均有统计学意义(均 $P < 0.01$)。见表 2 和图 1,2。

HCM 组在舒张早期的涡旋数量和舒张中期的涡旋数量、涡旋面积、循环强度均低于对照组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$);收缩早、中期仅涡旋面

积低于对照组,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。见表 3 和图 3,4。

三、相关性分析

收缩中期基底段 EL 与心指数呈负相关($r = -0.363, P < 0.01$);左房收缩期基底段、中间段 EL 与 E/e 呈正相关($r = 0.310, P < 0.05; r = 0.444, P < 0.01$)。舒张早期循环强度与 E 呈正相关($r = 0.456, P < 0.01$);左房收缩期循环强度与 A 呈正相关($r = 0.485, P < 0.01$)。EL 和循环与 Tei 指数无明显相关性。

四、循环及能量损耗的重复性检验

随机抽取 10 例研究对象,分别对上述参数进行重复性测量。观察者内的重复性检验在初步分析 5 d 之后由同一观察者对同一研究进行再次测量,观察者间的重复性检验由两名医师按照同一种方法前后两次分别测量以上参数,重复性均较好。见表 4。

表 1 HCM 组与对照组一般临床资料及常规超声测值比较($\bar{x} \pm s$)

组别	年龄(岁)	体表面积(m ²)	BMI(kg/m ²)	心率(次/min)	室间隔厚度(mm)	后壁厚度(mm)	舒张末期容积(ml)	收缩末期容积(ml)	射血分数(%)	每搏量(ml)
HCM 组	53.35±14.19	1.73±0.17	23.30±2.83	70.19±12.92	19.61±3.01	10.46±2.47	62.67±22.02	27.78±13.27	56.45±13.00	34.89±15.66
对照组	47.33±11.42	1.64±0.18	22.56±2.34	73.44±8.48	9.93±1.30	8.54±1.54	78.83±20.39	31.84±10.55	60.32±7.00	46.99±12.65
P 值	0.070	0.049	0.262	0.269	<0.001	<0.001	0.004	0.005	0.154	0.348

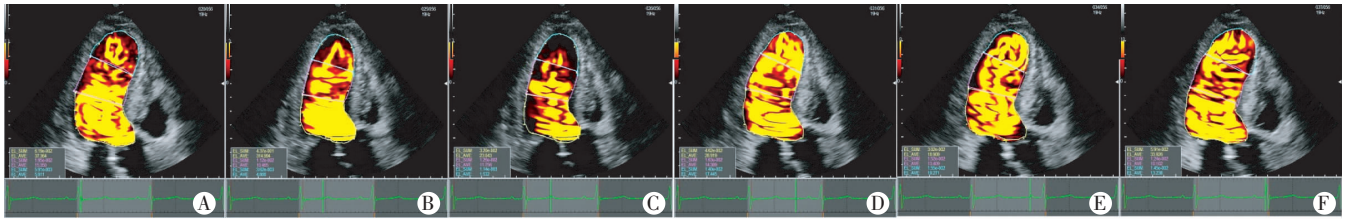
组别	心指数(L·min ⁻¹ ·m ⁻²)	心输出量(L/min)	等容收缩时间(ms)	等容舒张时间(ms)	Tei 指数	E(cm/s)	A(cm/s)	E/A	s(cm/s)	e(cm/s)	a(cm/s)	E/e
HCM 组	1.40±0.60	2.44±1.11	51.54±27.67	107.38±30.68	0.52±0.15	65.44±15.96	69.50±23.74	1.11±0.68	7.28±2.06	6.23±3.41	8.89±2.72	16.02±9.08
对照组	2.09±0.55	3.44±0.99	46.11±16.60	78.22±13.33	0.39±0.12	72.07±12.63	58.97±13.68	1.28±0.35	9.36±1.31	10.14±2.19	10.69±1.98	8.99±2.13
P 值	0.002	<0.001	0.340	<0.001	<0.001	0.073	0.050	0.193	<0.001	<0.001	0.004	<0.001

BMI:体质量指数;E:二尖瓣口舒张早期血流峰值速度;A:二尖瓣口舒张晚期血流峰值速度;E/A:二尖瓣口舒张早、晚期血流峰值速度之比;s:二尖瓣环收缩期运动峰值速度;e:室间隔侧二尖瓣环舒张早期运动峰值速度;a:二尖瓣环舒张晚期运动峰值速度;E/e:二尖瓣口舒张早期血流速度与室间隔侧二尖瓣环舒张早期运动峰值速度之比。

表 2 HCM 组与对照组各时相各节段 EL 比较($\bar{x} \pm s$)

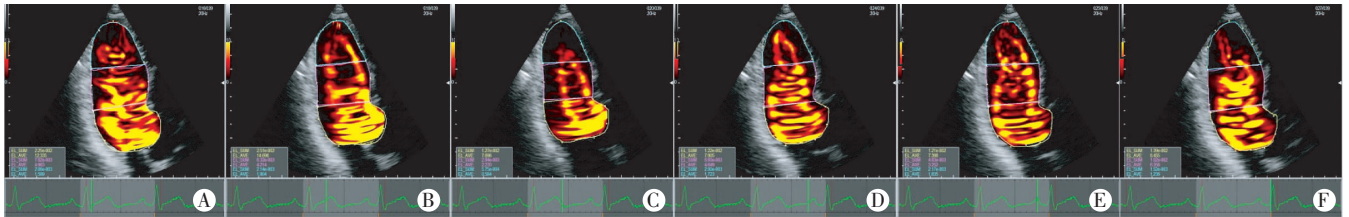
组别	舒张早期			舒张中期			左房收缩期		
	基底段	中间段	心尖段	基底段	中间段	心尖段	基底段	中间段	心尖段
HCM 组	22.91±21.33	15.04±9.97	13.06±9.56	27.22±33.89	13.30±26.94	8.62±11.07	63.20±71.88	39.22±47.34	9.32±13.48
对照组	38.96±48.29	12.23±7.96	7.59±4.80	13.35±8.85	13.06±11.53	4.38±3.19	22.46±18.34	7.20±5.15	4.36±3.35
Z 值	-1.626	-1.312	-2.325	-1.341	-1.997	-1.983	-1.712	-3.167	-1.027
P 值	0.608	0.189	0.020	0.180	0.046	0.047	0.087	0.002	0.304

组别	收缩早期			收缩中期			收缩晚期		
	基底段	中间段	心尖段	基底段	中间段	心尖段	基底段	中间段	心尖段
HCM 组	41.73±46.25	8.90±6.17	3.77±3.87	84.18±54.14	20.72±21.24	8.97±9.19	34.43±60.08	24.99±38.74	6.40±6.97
对照组	16.21±8.46	5.48±3.13	2.89±1.83	30.38±26.10	4.89±3.01	2.37±0.76	6.78±2.51	3.04±2.08	1.71±0.89
Z 值	-2.753	-1.783	-0.185	-4.322	-5.321	-5.421	-4.693	-5.350	-4.037
P 值	0.006	0.075	0.853	<0.001	<0.001	<0.001	<0.010	<0.001	<0.001



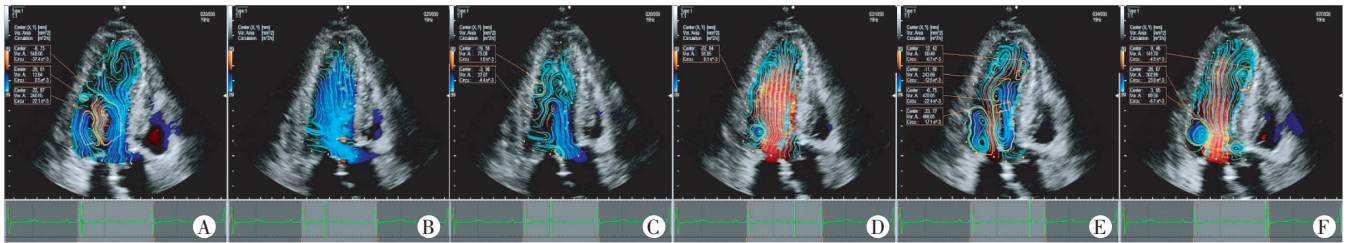
A:收缩早期;B:收缩中期;C:收缩晚期;D:舒张早期;E:舒张中期;F:左房收缩期。图中黄色越亮代表能量损耗越大,越黑能量损耗越小。

图 1 HCM 组不同时相能量损耗图



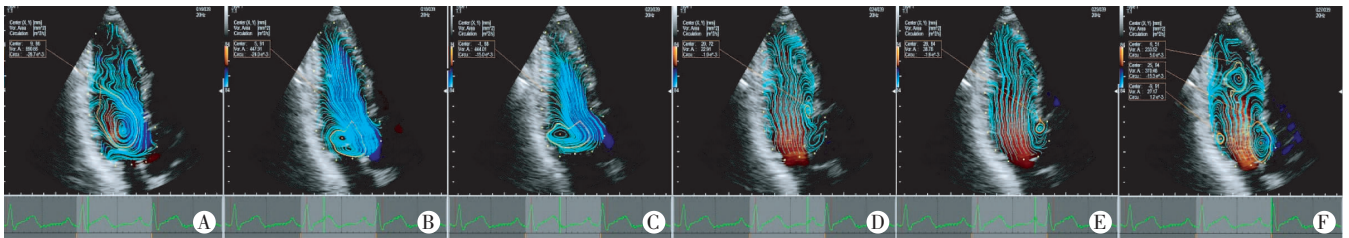
A:收缩早期;B:收缩中期;C:收缩晚期;D:舒张早期;E:舒张中期;F:左房收缩期。图中黄色越亮代表能量损耗越大,越黑能量损耗越小。

图 2 正常对照组不同时相能量损耗图



A:收缩早期;B:收缩中期;C:收缩晚期;D:舒张早期;E:舒张中期;F:左房收缩期。

图 3 HCM 组不同时相循环图



A:收缩早期;B:收缩中期;C:收缩晚期;D:舒张早期;E:舒张中期;F:左房收缩期。

图 4 正常对照组不同时相循环图

讨 论

HCM 是一种较常见的心血管疾病,超声心动图是临床诊断 HCM 的首选检查方法,但传统超声心动图无法显示心腔内的血流动力学改变情况,其对心功能评价的方法多基于心室壁运动;室壁运动的变化对该病的早期诊断并不敏感。心脏瓣膜病、缺血性心脏病改变了心室内涡旋的形态同时增加了能量的消耗^[4-5],心室内的涡旋及其本身的能量效能影响着患者的愈后^[6-7]。本研究应用 VFM 技术中循环和能量损耗这两个新的定量指标,对非梗阻型 HCM 患者左室腔内涡旋数量、涡旋面积、循环强度及其 EL 做出定量评价,为早期心功能

评价提供依据。

循环又称速度环量,是血流所形成涡旋在闭合曲线上切线方向的速度分量的积分,其大小取决于指定闭合曲线的面积,当流速增大时循环值变大^[8]。本研究结果显示,对照组的涡旋形态、特征及出现的位置与之前文献报道结果基本一致,即正常成人的左室在舒张期其二尖瓣口血流形成一对大小不等方向相反的涡旋,在等容收缩期,涡旋保存在左室,这些涡旋可暂时蓄积动能,支持血流在射血前期改变方向流向流出道,同时生成及时关闭二尖瓣的推力^[9-10]。在快速射血期,心室收缩,心室容积减小,涡旋逐渐消失,涡旋不仅支持血流在射血前期改变方向流向流出道,而且避免血

表 3 HCM 组与对照组各时相循环比较($\bar{x}\pm s$)

组别	舒张早期			舒张中期			左房收缩期		
	涡旋数量(个)	涡旋面积(mm ²)	循环强度(m ² /s)	涡旋数量(个)	涡旋面积(mm ²)	循环强度(m ² /s)	涡旋数量(个)	涡旋面积(mm ²)	循环强度(m ² /s)
HCM 组	0.84±0.59	112.17±101.64	7.24±6.81	1.53±0.79	323.21±241.42	15.75±13.93	1.76±0.56	262.11±158.85	20.73±16.99
对照组	1.54±0.89	173.61±141.61	14.17±15.73	2.07±0.65	532.69±261.65	24.22±12.47	2.08±0.64	321.07±201.89	16.09±12.57
Z 值	-3.359	-1.655	-1.819	-2.579	-2.939	-2.768	-1.733	-1.098	-1.070
P 值	0.001	0.098	0.069	0.010	0.003	0.006	0.083	0.272	0.285

组别	收缩早期			收缩中期			收缩晚期		
	涡旋数量(个)	涡旋面积(mm ²)	循环强度(m ² /s)	涡旋数量(个)	涡旋面积(mm ²)	循环强度(m ² /s)	涡旋数量(个)	涡旋面积(mm ²)	循环强度(m ² /s)
HCM 组	1.89±0.74	392.88±230.79	22.16±14.62	1.24±0.75	187.93±167.63	19.14±21.87	1.05±0.73	174.62±192.12	9.69±10.97
对照组	2.18±0.69	566.21±204.86	21.15±7.62	1.25±0.52	287.11±158.52	12.29±6.88	1.19±0.45	210.72±121.91	5.42±2.91
Z 值	-1.247	-2.782	-0.271	-0.354	-2.425	-0.150	-1.378	-1.876	-0.842
P 值	0.212	0.005	0.786	0.723	0.015	0.881	0.168	0.061	0.400

表 4 循环及能量损耗的重复性检验

参数	观察者内		观察者间	
	相关系数	95%CI	相关系数	95%CI
EL 基底段	0.953	0.921~0.972	0.940	0.900~0.964
EL 中间段	0.982	0.970~0.989	0.983	0.972~0.990
EL 心尖段	0.965	0.942~0.979	0.937	0.894~0.962
涡旋数量	0.840	0.732~0.904	0.894	0.822~0.937
涡旋面积	0.912	0.852~0.947	0.908	0.846~0.945
循环强度	0.909	0.848~0.946	0.894	0.822~0.937

流的减速和再加速造成的能量损耗^[11-12]。本研究中, HCM 患者左室血流动力学已失去上述规律, E/e>15, 左室充盈压显著升高, 左房血流进入左室受限, 左室流入道血流对二尖瓣的冲击力降低, 使得正常涡旋形成受阻, 取而代之是一些小的无效涡旋; 另一方面 HCM 患者存在非对称性心肌肥厚, 纤维化, 这必然造成舒缩活动的不同步性, 可能存在一部分心肌仍在收缩而另一部分心肌已经开始舒张的情况^[13], 心室内血流紊乱, 呈现出杂乱无章的无效涡旋。研究^[14]表明, 收缩末期容积增加和心输出量的减小将导致心室有充分的空间形成涡旋, 而 HCM 患者的舒张末期和收缩末期容积均减小, 使得有效涡旋形成受阻, 这些可能均是导致肥厚型心肌病舒张早期涡旋数量, 舒张中期涡旋数量、涡旋面积、循环强度及收缩早、中期涡旋面积均低于对照组的原因。这种差异通过 VFM 新技术循环得到了较好地反映。

本研究中两组受试者 E/A>1, 但 HCM 组左室舒

张功能并不等同与对照组, 同时肥厚型心肌病患者左室壁肥厚、左室舒张末期容积减小, 应用双平面 Simpson's 法估算左室射血分数会过高估计患者的左室收缩功能。左室射血分数及反映舒张功能的 E/A 值均是负荷依赖指标, 并不能完全真实反映心肌收缩和舒张功能^[15], 而且大多数 HCM 患者在临床出现心功能障碍之前, 心腔内的血流动力学可能已发生改变。能量损耗是一个新的血流动力学参数, 血液存在黏滞性, 在湍流出现或速度向量较大的地方就会产生摩擦热, 这种摩擦热消耗的能量称为血流的能量损耗。能量损耗等于相邻向量差异的平方的合计, 所以在向量变化大的位点能量损耗就大, 在层流的位点能量损耗就小^[16]。如果心脏的正常生理功能发生紊乱, 涡旋就失去本身适当的形状同时也增加了能量的损耗^[5]。本研究结果显示两组间射血分数无明显差异时, HCM 组 EL 在收缩早期基底段及收缩中、晚期各段明显高于正常成人, 说明能量损耗可以更早、更敏感地反映 HCM 左室收缩功能, 优于射血分数; 在 E/A 值基本无明显差异时, 舒张早期心尖段、左房收缩期中间段 EL 均高于对照组, 说明该指标能够较早地反映 HCM 异常。上述结果一方面是由于无效的涡旋增加心室的能量损耗; 另一方面心肌细胞肥大是左室功能减退而发生代偿作用的结果, 进而造成左室内高动力、高速度的血流状态, 加之 HCM 的非对称性室壁肥厚和心肌纤维排列紊乱必然会引起左室舒张的非同步性, 进而导致左室舒张功能障碍。如果舒张早期左室某一节段仍在收缩, 另一节段已开始舒张, 两者之间将出现压差, 通过虹吸作用导

致左室腔内的血流加速^[13],这种心脏的代偿机制需要额外的做功来维持足够射血效能,这势必会增加心室的能量损耗^[4]。左房收缩期中间段 EL 显著高于对照组同时也与左室的代偿机制有关,舒张早期左房血流进入左室受限,为了维持足够射血效能,心房收缩增加,这种额外的做功需要消耗更多的能量^[4]。由于二尖瓣口的湍流,导致基底段能量损耗的增加,同时从基底段到心尖段速度分量依次减低,产生的摩擦热也减低,这些均是两组间 EL 在各个时相从基底段到心尖段依次减低的原因。因此能量损耗可能会成为早期发现肥厚型心肌病患者心功能异常的敏感指标。

本研究中收缩中期基底段 EL 与心指数呈负相关,表明能量损耗可用于评价不同个体间心脏泵血功能。舒张早期循环强度与 E 呈正相关,左房收缩期循环强度与 A 呈正相关,表明前负荷影响舒张早期的循环强度。E/e 一直作为评价心脏舒张功能较好的指标,本研究中,左房收缩期基底段、中间段 EL 与 E/e 呈正相关,表明循环及能量损耗可作为未来评价心功能的可靠指标。

本研究的局限性:目前研究病例数较少,HCM 诊断主要以超声心动图为主,同时结合临床排除其他引起非对称性室壁增厚的原因,未做相应的病理学检查。本研究仅对非梗阻性 HCM 患者能量损耗及循环变化进行初步的临床研究,其他临床应用价值有待进一步研究。

综上所述,VFM 技术中循环和能量损耗这两个新参数,提供了一种全新的早期评估 HCM 患者的心功能改变的方法,未来将有可能成为 HCM 患者治疗前后评估血流动力学状态及心功能的较好工具。

参考文献

- [1] Zou Y, Song L, Wang Z, et al. Prevalence of idiopathic hypertrophic cardiomyopathy in China: a population-based echocardiographic analysis of 8080 adults [J]. *Am J Med*, 2004, 116(1): 14-18.
- [2] Palmon LC, Reichel N, Yeon SB, et al. Intramural myocardial shortening in hypertensive left ventricular hypertrophy with normal pump function [J]. *Circulation*, 1994, 89(1): 122-131.
- [3] Elliott PM, Anastakis A, Borger MA, et al. 2014 ESC Guidelines on diagnosis and management of hypertrophic cardiomyopathy [J]. *Kardiol Pol*, 2014, 72(11): 1054-1126.
- [4] Agati L, Cimino S, Tonti G, et al. Quantitative analysis of intraventricular blood flow dynamics by echocardiographic particle image velocimetry in patients with acute myocardial infarction at different stages of left ventricular dysfunction [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2014, 15(11): 1203-1212.
- [5] Stugaard M, Koriyama H, Katsuki K, et al. Energy loss in the left ventricle obtained by vector flow mapping as a new quantitative measure of severity of aortic regurgitation: a combined experimental and clinical study [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(7): 723-730.
- [6] Bahlmann E, Gerdtts E, Cramariuc D, et al. Prognostic value of energy loss index in asymptomatic aortic stenosis [J]. *Circulation*, 2013, 127(10): 1149-1156.
- [7] Pedrizzetti G, La Canna G, Alfieri O, et al. The vortex—an early predictor of cardiovascular outcome [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2014, 11(9): 545-553.
- [8] 申凯凯, 王珍珍, 邓颖, 等. 血流向量成像技术评价尿毒症患者左心室舒张功能的研究 [J]. *中华超声影像学杂志*, 2015, 24(11): 942-947.
- [9] Pedrizzetti G, Domenichini F. Nature optimizes the swirling flow in the human left ventricle [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95(10): 108101.
- [10] Schenkel T, Malve M, Reik M, et al. MRI-based CFD analysis of flow in a human left ventricle: methodology and application to a healthy heart [J]. *Ann Biomed Eng*, 2009, 37(3): 503-515.
- [11] Hong GR, Pedrizzetti G, Tonti G, et al. Characterization and quantification of vortex flow in the human left ventricle by contrast echocardiography using vector particle image velocimetry [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2008, 1(6): 705-717.
- [12] Kilner PJ, Yang GZ, Wilkes AJ, et al. Asymmetric redirection of flow through the heart [J]. *Nature*, 2000, 404(6779): 759-761.
- [13] 钟明, 张运, 赵静, 等. 肥厚型心肌病患者左室内血流空间分布的探讨 [J]. *中国超声医学杂志*, 2004, 20(12): 50-52.
- [14] Fukuda N, Itatani K, Kimura K, et al. Prolonged vortex formation during the ejection period in the left ventricle with low ejection fraction: a study by vector flow mapping [J]. *J Med Ultrason* (2001), 2014, 41(3): 301-310.
- [15] 潘敏, 邓又斌, 常青, 等. 定量组织多普勒速度成像对肥厚型心肌病患者左心室局部舒张功能的研究 [J]. *中华超声影像学杂志*, 2003, 12(8): 4-7.
- [16] Itatani K, Uejima T, Tanaka T, et al. Intraventricular flow velocity vector visualization based on the continuity equation and measurements of vorticity and wall shear stress [J]. *Jpn J Appl Phys*, 2013, 52(7): 1044-1055.

(收稿日期: 2016-06-28)