

## · 心血管影像学 ·

# 心血管 MRI 特征追踪技术评估业余马拉松运动员心室心肌应变

伍琪, 张恒锐, 孙娟弟, 陈云兵, 田鑫, 兰红琳

**【摘要】目的:**应用心血管磁共振成像特征追踪(cMRI-FT)技术评估长期马拉松运动对双侧心室结构和功能的影响。**方法:**对 31 名跑龄大于 2 年的业余马拉松运动员[年龄(40.94±4.90)岁, 跑龄(5.97±0.76 年)]和 16 名年龄和性别相匹配的健康志愿者[年龄(41.94±5.31)岁]进行 cMRI 检查, 获得左室长轴位两腔心、三腔心、四腔心及心室短轴位电影序列图像, 采用 CVI42 后处理软件分析和测量心脏结构和功能等相关参数, 包括左、右心室舒张末期容积(EDV)、舒张末期容积指数(EDVi)、收缩末期容积(ESV)、收缩末期容积指数(ESVi)、心输出量(CO)、心输出量指数(COI)、每搏输出量(SV)、每搏输出量指数(SVi)、左室射血分数(LVEF)及左心室质量指数(LVMI)。采用 FT 技术分析双侧心室的心肌应变参数, 包括左、右心室整体及节段(基底段、中间段、心尖段)的纵向应变(LS)、周向应变(CS)和径向应变(RS)。采用问卷调查形式获得马拉松运动的相关参数(跑步年限、每周跑步时长及每周跑步距离)及临床参数[静息心率和体表面积(BSA)等]。采用独立样本 t 检验和非参数检验等方法比较 2 组间各项心脏定量参数的差异, 并采用 Spearman 相关性分析对运动员组的心功能及跑步参数与心肌应变参数的相关性进行分析。**结果:**马拉松组的静息心率和 BSA 显著低于对照组( $P<0.05$ )。与对照组相比:马拉松组的左室质量分数(LVMI)、左心室舒张末期容积指数(LVEDVi)、右心室舒张末期容积指数(RVEDVi)、左心室收缩末期容积指数(LVESVi)、右心室收缩末期容积指数(RVESVi)均显著升高( $P<0.001$ );左心室整体径向应变(LV-GRS)、左心室整体周向应变(LV-GCS)和右心室整体纵向应变(RV-GLS)均显著减低( $P<0.05$ );左心室基底段及中间段的径向应变, 左心室基底段、中间段及心尖段的周向应变均显著减低( $P<0.05$ );但左心室整体及各节段的纵向应变无显著差异( $P>0.05$ );两组间 LVEF 无显著差异( $P>0.05$ )。每周跑步距离与 LVEDV( $r=0.528, P=0.003$ )和 RV-EDV( $r=0.503, P=0.005$ )呈中度正相关。**结论:**在左室射血分数正常的情况下, 业余马拉松运动员左、右心室的部分收缩及舒张功能升高, 而左、右心室心肌应变力减低, 这可认为是心室对耐力运动的良好适应。业余马拉松运动员的每周训练量与双心室容量有一定相关性。

**【关键词】** 业余马拉松运动员; 心血管磁共振成像; 特征追踪; 心肌应变

**【中图分类号】** R445.2; R542.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2024)08-1051-05

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.08.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**Evaluation of biventricular myocardial strain in amateur marathoners by cardiovascular magnetic resonance imaging with feature tracking technique** WU Qi, ZHANG Heng-rui, SUN Juan-di, et al. The Graduate School of Changzhi Medical College, Shanxi 046000, China

**【Abstract】 Objective:** The purpose of this study was to assess the long-term effect of marathon on the biventricular structure and function of amateur marathoners using cardiovascular magnetic resonance imaging with feature-tracking (cMRI-FT) technique. **Methods:** A total of 31 amateur marathoners [age of (40.94±4.90) years, running age of (5.97±0.76) yrs] and 16 healthy volunteers [age of (41.94±5.31) yrs] with matching age and sex underwent cardiovascular magnetic resonance imaging (cMRI), cine sequences images of the left ventricular long axis two-chamber, three-chamber, four-chamber, and short-axis views were obtained. The cardiac structure and functional parameters were analyzed and measured using CVI42 post-processing software, including left and right ventricular end-

**作者单位:** 046000 山西长治, 长治医学院研究生院(伍琪、张恒锐、孙娟弟); 048000 山西晋城, 晋城市人民医院影像科(陈云兵、田鑫、兰红琳)

**作者简介:** 伍琪(1997—), 女, 四川绵阳人, 硕士研究生, 住院医师, 主要从事心胸疾病影像诊断工作。

**通讯作者:** 兰红琳, E-mail:jcmrlhl@163.com

**基金项目:** 山西省基础研究计划项目基金(20210302123015)

diastolic volume (EDV), end-diastolic volume index (EDVi), end-systolic volume (ESV), end-systolic volume index (ESVi), cardiac output (CO), cardiac output index (COi), stroke volume (SV), stroke volume index (SVi), left ventricular ejection fraction (LVEF), and left ventricular mass index (LV-MI). Feature tracking (FT) technique was employed to analyze myocardial strain parameters of left and right ventricles, including longitudinal strain (LS), circumferential strain (CS), and radial strain (RS) of the global and segmental (basal, mid, apical) ventricle. Running parameters (years of running, weekly running time and distance) and clinical parameters (resting heart rate, body surface area (BSA), etc.) were obtained through questionnaire survey. **Results:** Amateur marathoners showed lower resting heart rate and BSA ( $P < 0.05$ ). Left ventricular mass index (LVMI) of amateur marathoners was significantly higher ( $P < 0.001$ ). Left ventricular end-diastolic volume index (LVEDVi), right ventricular end-diastolic volume index (RVEDVi), left ventricular end-systolic volume index (LVESVi) and right ventricular end-systolic volume index (RVESVi) were significantly higher in amateur marathoners ( $P < 0.001$ ). The left ventricular global radial strain (LV-GRS), circumferential strain (LV-GCS) and right ventricular global longitudinal strain (RV-GLS) of amateur marathoners were lower than the control group (all  $P < 0.05$ ). The radial strain of basal and mid-segments in left ventricle and the circumferential strain of basal, mid and apical segments in left ventricle decreased (all  $P < 0.05$ ), but there was no significant difference in the left ventricular global and segmental longitudinal strain (all  $P > 0.05$ ). There was no significant difference in LVEF ( $P > 0.05$ ). Finally, we found that weekly running distance was associated with LVEDV ( $r = 0.528, P = 0.003$ ) and RVEDV ( $r = 0.503, P = 0.005$ ). **Conclusion:** Under the condition of normal left ventricular ejection fraction, amateur marathon athletes have increased partial systolic and diastolic function of left and right ventricle and decreased left and right ventricular myocardial strain, which can be considered as a good adaptation of ventricle to endurance exercise. There is a certain correlation between the weekly training distance of amateur marathoners and the biventricular volume.

**【Key words】** Cardiovascular magnetic resonance imaging; Feature-tracking; Myocardial strain; Amateur marathoners

近几十年来,马拉松已经成为发展最快的运动之一,在中国参与该项运动的人群逐年增加。规律的高强度运动使得心脏的血流动力学需求显著增加,继而导致心脏的结构和功能出现一系列适应性变化<sup>[1]</sup>。研究发现,作为一种耐力运动,马拉松可引起心脏的对称性或偏心性重塑反应,从而可表现为四腔心扩大、左心室(left ventricular, LV)和右心室(right ventricular, RV)舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV)和左心室质量(left ventricular mass, LVM)的增加等,甚至会导致心源性猝死、心力衰竭等不良心血管事件<sup>[2]</sup>。因此,尽早发现心肌的细微变化,预防不良事件的发生,对运动员的健康有十分重要的意义。

心肌应变可以在心脏结构及射血分数(ejection fraction, EF)等功能参数出现异常之前发生改变,通过测量心肌应变不仅可以检测心肌收缩功能早期受损情况<sup>[3-4]</sup>,还可对心肌局部运动进行分析。应变是指作用力产生的变形,心肌应变是指心肌长度从松弛状态到收缩状态的百分比变化<sup>[5]</sup>。心肌应变相关定量参数主要包括短轴径向应变(radial strain, RS)、周向应变

(circumferential strain, CS)和长轴纵向应变(longitudinal strain, LS)。

目前,超声心动图斑点追踪技术和心血管磁共振成像(cardiovascular magnetic resonance imaging, cMRI)特征追踪(feature tracking, FT)技术是应变分析的常用技术。cMRI 拥有更高的空间和软组织分辨率,较超声心动图能更准确地检测心脏形态和功能的变化,且 cMRI-FT 技术无需复杂的后处理,可直接应用于常规电影序列,是目前分析心肌应变的金标准<sup>[2]</sup>。现有的对马拉松运动员的研究主要集中于马拉松前和马拉松后心脏结构和功能的短期改变<sup>[6-8]</sup>,而关于长期耐力运动对业余马拉松运动员心脏结构和功能的影响的研究甚少,目前还未有对业余马拉松运动员左、右心室节段应变的研究。本研究中采用 cMRI-FT 技术定量评估业余马拉松运动员与久坐健康志愿者左、右心室的心肌应变,分析业余马拉松运动员心肌应变的变化规律,旨在早期发现业余马拉松运动员心脏的细微变化。

## 材料与方法

### 1. 一般资料

于 2023 年 4 月—2023 年 11 月前瞻性招募 20~50 岁的业余马拉松运动员(定义:未参加专业的培训,职业不是马拉松<sup>[9]</sup>)。纳入标准:①至少参加 1 次官方全程马拉松比赛;②近 2 年持续每周跑步至少 3 次、每周跑量至少 30 公里。

同期选取年龄、性别相匹配的健康志愿者作为对照组。纳入标准:①每周规律锻炼时间小于 3 h;②近 10 年从事静坐工作。排除标准:①患有心脑血管疾病或糖尿病等;②有磁共振检查禁忌证;③cMRI 图像不完整或图像效果差。

最终,将 31 名业余马拉松运动员及 16 名健康志愿者纳入本研究。通过问卷调查的形式记录每例受试者的一般资料:对于业余马拉松运动员,记录姓名、性别、年龄、跑步年限、每周跑步时长及距离等;对于健康志愿者,记录姓名、性别和年龄。测量并记录每例受试者的身高、体重、BMI、体表面积(body surface area, BSA)和静息心率。

本研究经本单位伦理委员会审批(JCPH, NO20221201010),所有受试者签署了知情同意书。

### 2. cMRI 检查方法

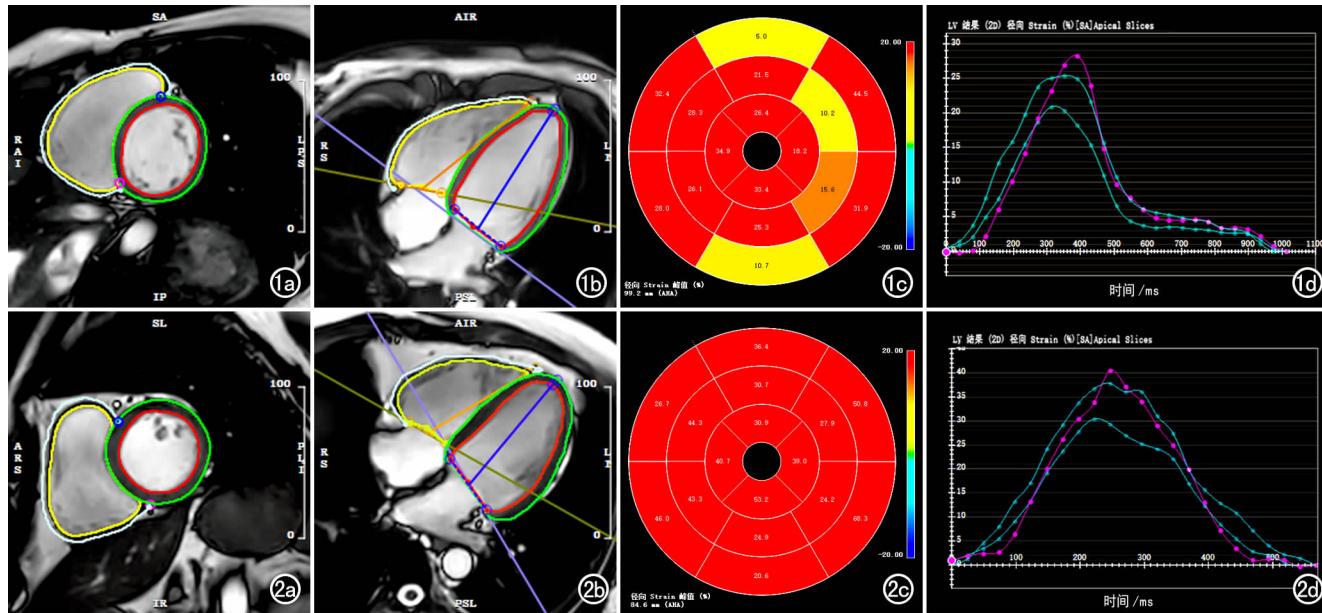


图 1 男,38岁,进行业余马拉松运动3年,cMRI及心室应变参数的测量示意图。a)电影序列短轴位舒张末期图像,软件勾画左、右心室的心内外膜;b)电影序列四腔心舒张末期图像,软件勾画左、右心室的心内外膜;c)左心室16节段径向应变值;d)左心室基底段、中间段和心尖段的径向应变分析曲线,显示最大值分别约21%、25%、28%,皆低于正常对照组。

使用 Philips Ingenia 3.0T 磁共振扫描仪和专用心脏相控阵线圈,采用心电和呼吸门控技术,采用电影序列采集左室长轴位两腔心、三腔心、四腔心及心室短轴位图像,主要扫描参数:TE 1.46 ms, TR 2.9 ms, 矩阵 288×152, 视野 300 mm×300 mm, 层厚 9 mm, 层间距 0 mm, 翻转角 45°, 激励次数 1。

### 3. 图像后处理

将图像导入 CVI42 软件(Circle Cardiovascular 图像软件,Circle Cardiovascular Imaging 公司,加拿大)进行图像分析和参数测量。

心功能分析:于心室短轴位电影序列图像上,软件自动勾画左、右室在舒张末期和收缩末期时的左室心内膜、心外膜及右室心内膜的轮廓曲线,乳头肌及肌小梁排除在外,然后由具有 3 年以上工作经验的影像医师进行人工校正。随后,软件即可自动测量出各项心脏结构和功能参数,包括左、右心室的舒张末期容积(EDV)、舒张末期容积指数(end-diastolic volume index, EDVi)、收缩末期容积(end-systolic volume, ESV)、收缩末期容积指数(end-systolic volume index, ESVi)、心输出量(cardiac output, CO)、心输出量指数(cardiac output index, COi)、每搏输出量(stroke volume, SV)、每搏输出量指数(stroke volume index, SVi)、左室射血分数(LV ejection fraction, LVEF)和

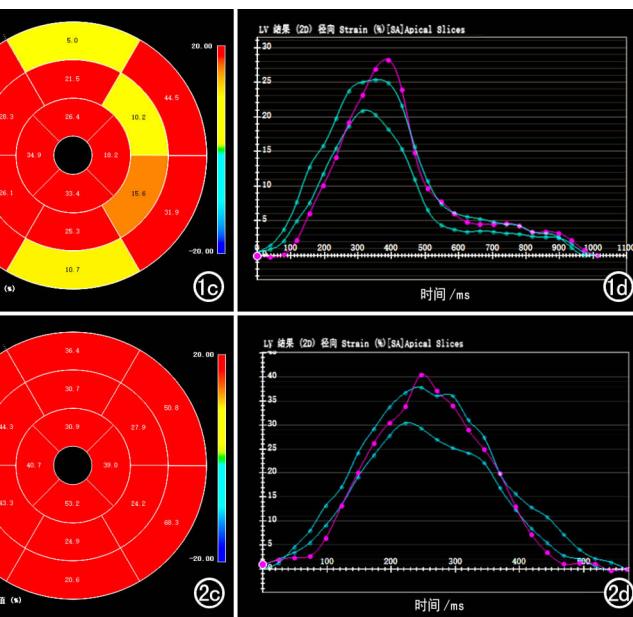


图 2 男,40岁,健康志愿者,cMRI及心室应变参数的测量示意图。a)电影序列短轴位图像上于舒张末期勾画左、右心室的心内外膜;b)电影序列四腔心上于舒张末期勾画左、右心室的心内外膜;c)左心室16节段径向应变值;d)左心室基底段、中间段和心尖段的径向应变分析曲线,显示最大值分别约30.5%、38.0%和40.5%。

## 左心室质量指数(LV mass index, LVMI)。

**心肌应变分析:**在特征追踪模块中,在舒张末期的心室长轴位两腔心、三腔心及四腔心及心室短轴位图像上软件自动勾画出左心室的心内、外膜及右心室心内膜,然后由医师进行手动校正并手动勾画右心室心外膜,软件即可自动跟踪心室内、外膜在整个心动周期的运动轨迹,并计算出左、右心室整体及节段(基底段、中间段、心尖段)的纵向、周向和径向应变(图 1、2)。

### 4. 统计学分析

使用 SPSS 23.0 软件进行数据分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验进行计量资料的正态性检验,符合正态分布的计量资料以均值±标准差表示,采用独立样本 t 检验进行组间比较;非正态分布的计量资料采用非参数检验进行组间比较,分类变量的组间比较采用卡方检验,这两类资料以中位数(四分位间距)表示。采用 Spearman 相关性分析评估运动员心功能参数与心室应变参数的关系。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。随机抽取 10 例受试者的图像,由两位具有 3 年以上工作经验的影像科医师独立进行应变分析;其中一位医师间隔一个月后再次进行分析。采用组内相关系数(ICC)评估观察者内和观察者间应变分析结果的可重复性。ICC>0.75 为可重复性较好。

## 结 果

### 1. 一般临床资料的比较

运动员组和对照组一般资料的比较结果详见表 1。两组间性别、年龄和 BMI 的差异均无统计学意义( $P > 0.05$ )。运动员组的静息心率和体表面积低于对照组( $P < 0.05$ )。

### 2. 左、右心室结构和功能参数的比较

两组的左、右心室结构和功能参数测量值及组间比较结果见表 2。两组间 LVEF 的差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。与对照组相比,运动员组的 LVMI、LV-EDVi、RVEDVi、LVESVi、RVESVi 和 LVSVi 均显著

升高( $P < 0.001$ )。

### 3. 两组心室应变参数的比较

两组左、右心室的整体和局部应变参数的比较结果见表 3 和图 3。

**左心室应变的比较:**与对照组比较,运动员组 LV-GRS 和 LV-GCS 均显著减小( $P < 0.05$ );左心室基底段及中间段的径向应变,以及左心室基底段、中间段及心尖段的周向应变均减小( $P < 0.05$ );左心室整体及各节段的纵向应变无显著差异( $P > 0.05$ )。

**右心室应变的比较:**与对照组比较,运动员组的 RV-GLS 显著减小;两组间右心室周向应变和径向应变的差异均无统计学意义( $P > 0.05$ )。

### 4. 相关性分析

马拉松运动员的长跑参数与心功能参数、应变参数及心功能参数与应变参数的相关性分析图见图 4。

运动员组的 LVEF 与 LV-GLS 和 LV-GCS 呈负相关( $r = -0.444, P = 0.014; r = -0.734, P < 0.001$ )。每周跑步距离与 LVEDV 和 RVEDV 均呈中度正相关( $r = 0.528, P = 0.003; r = 0.503, P = 0.005$ ),与 RV-GLS 呈弱正相关( $r = 0.373, P = 0.039$ )。LVESVi 与 LV-GRS 和 LV-GCS 均具有显著相关性( $r = -0.7, P < 0.001; r = 0.696, P < 0.001$ )。

### 5. 一致性分析

采用 ICC 对 10 例受试者的左、右心室整体应变及左心室各节段应变进行了观察者内和观察者间的可重复性分析,结果显示所有应变参数在观察者内和观察者间的 ICC 均大于 0.80,表明所有应变参数的可重复性均较好。

## 讨 论

本研究中采用 cMRI-FT 技术对业余马拉松运动员 LV 和 RV 的心肌应变进行了定量分析,重要结果如下:①运动员组的 LV-GRS、LV-GCS 和 RV-GLS 较正常对照组减低;②运动员组的双心室容量与每周

表 1 两组人群基线资料比较

指标	运动员组	对照组	t 值	P 值
年龄/岁	40.94±4.90	41.94±5.31	-0.646	0.522
性别/例			0.261	0.609
男	16	7		
女	15	9		
体重/kg	63.87±9.35	59.63±6.26	1.850	0.071
身高/m	1.70±0.06	1.60±0.06	2.886	0.006
BMI/kg/m <sup>2</sup>	22.33±2.23	22.35±1.56	-0.034	0.973
BSA/m <sup>2</sup>	1.69±0.15	1.61±0.11	2.114	0.040
静息心率/min <sup>-1</sup>	56.17±8.07	67.31±6.17	-4.818	<0.001
跑步年限	5.97±0.76	—	—	—
每周跑步时长/h	5.00(4.00,7.00)	—	—	—
每周跑步距离/km	50.00(4.00,78.00)	—	—	—

表 2 两组人群心功能参数的比较

指标	运动员组	对照组	t 值	P 值
LVEF	56.81% ± 6.62%	60.58% ± 6.05%	-1.900	0.064
LVM/g	93.19 ± 19.76	63.35 ± 11.83	5.521	<0.001
LVMI/g·m <sup>2</sup>	53.18 ± 13.99	39.25 ± 5.10	7.013	<0.001
LVEDV/mL	149.34 ± 20.42	107.91 ± 14.75	7.163	<0.001
LVEDVi/mL·m <sup>2</sup>	86.82 ± 12.04	65.64 ± 6.51	7.743	<0.001
LVESV/mL	64.73 ± 14.00	42.80 ± 10.28	5.512	<0.001
LVESVi/mL·m <sup>2</sup>	37.54 ± 7.68	25.92 ± 5.07	6.145	<0.001
LVSV/mL	84.61 ± 14.14	65.11 ± 9.59	4.931	<0.001
LVSVi/mL·m <sup>2</sup>	49.29 ± 8.73	39.73 ± 5.44	4.562	<0.001
LVCO/L/min	4.73 ± 0.75	4.37 ± 0.51	1.696	0.097
LVCOi/L·min <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>	2.75 ± 0.47	2.67 ± 0.31	0.644	0.520
RVEDV/mL	157.30 ± 21.51	109.69 ± 22.52	7.037	<0.001
RVEDVi/mL·m <sup>2</sup>	91.28 ± 11.68	66.53 ± 10.56	7.067	<0.001
RVESV/mL	86.75 ± 19.86	50.70 ± 16.06	6.243	<0.001
RVESVi/mL·m <sup>2</sup>	50.26 ± 10.63	30.69 ± 8.57	6.339	<0.001
RVSV/mL	70.56 ± 16.90	59.36 ± 12.44	2.329	0.025
RVSVi/mL·m <sup>2</sup>	41.02 ± 9.63	36.11 ± 6.42	1.828	0.074
RVCO/L/min	3.98 ± 1.09	4.03 ± 0.95	-0.144	0.886
RVCOi/L·min <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>	2.24 ± 0.73	2.45 ± 0.54	-1.035	0.310

表 3 两组间左、右心室应变的比较

部位和应变类型	运动员组	对照组	t 值	P 值
LVLS 基底段	-23.50% ± 2.11%	-23.41% ± 2.46%	-0.122	0.904
LVLS 中间段	-13.10% ± 3.06%	-14.36% ± 2.53%	1.397	0.170
LVLS 心尖段	-15.04% ± 2.49%	-15.55% ± 2.16%	0.692	0.492
LV-GS	-17.24% ± 1.79%	-17.93% ± 1.29%	1.366	0.179
LVRS 基底段	35.06% ± 5.52%	38.61% ± 4.99%	-2.153	0.037
LVRS 中间段	27.52% ± 5.04%	30.01% ± 2.58%	-2.245	0.030
LVRS 心尖段	35.95% ± 10.83%	40.61% ± 8.46%	-1.498	0.141
LV-GRS	31.14% ± 5.21%	34.78% ± 3.45%	-2.520	0.015
LVCS 基底段	-19.62% ± 1.74%	-20.85% ± 1.47%	2.422	0.020
LVCS 中间段	-17.15% ± 2.05%	-18.34% ± 0.96%	2.711	0.009
LVCS 心尖段	-19.55% ± 3.15%	-21.48% ± 2.34%	2.165	0.036
LV-GCS	-18.36% ± 1.91%	-19.83% ± 1.13%	3.313	0.002
RV-GS	-20.97% ± 4.09%	-24.72% ± 3.00%	3.233	0.002
RV-GRS	17.43% ± 7.10%	21.03% ± 8.20%	-1.562	0.125
RV-GCS	-10.81% ± 4.71%	-12.57% ± 3.74%	1.298	0.201

训练量有显著相关性,既往的研究中很少提及这一结果。

窦性心动过缓、左右心室腔大小适度增加和峰值耗氧量增高是耐力运动员心脏的公认特征<sup>[10]</sup>。有研究结果表明我国专业运动员因长期从事高强度运动所引起的心脏重塑以左、右室均衡性增大、左心室壁轻度

增厚、左、右室射血分数减低、以及心肌应变参数值减小为主要表现,是一种心脏功能储备增大的生理适应性改变<sup>[11]</sup>。LVEF 大于 50% 为正常,但一些优秀耐力运动员的 LVEF 仅为 45%~50%,较普通人群 轻度降低<sup>[12]</sup>,本研究中,运动员组的 LVEF 和心率均较对照组减低,运动员静息状态下 LVEF 下降、心率减慢

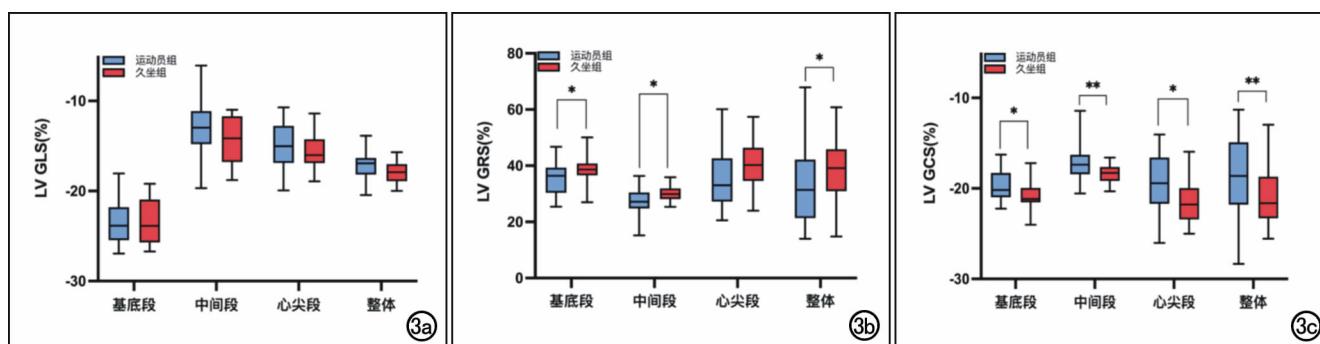


图 3 两组间左心室局部和整体应变的对比。a) 纵向应变的中位数和四分位间距;b) 径向应变的中位数和四分位间距;c) 周向应变的中位数和四分位间距。<sup>\*</sup> P<0.05, <sup>\*\*</sup> P<0.01。

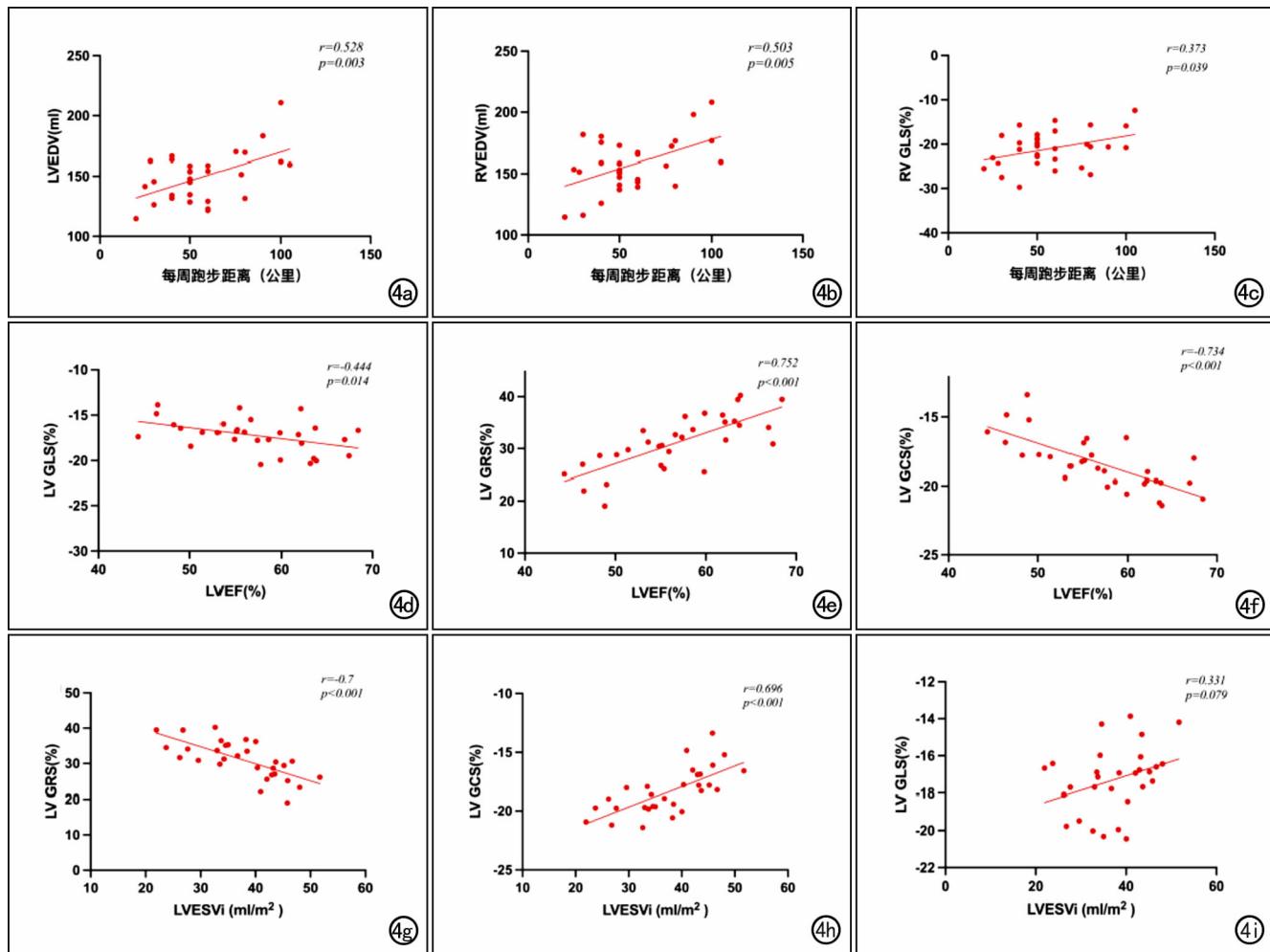


图 4 业余马拉松运动员心肌应变、心功能及跑步参数之间的相关性分析图。a)每周跑步距离与 LVEDV 呈中度正相关；b)每周跑步距离与 RVEDV 呈中度正相关；c)每周跑步距离与 RV-GLS 呈轻度正相关；d)LVEF 与 LV-GLS 呈中度负相关；e)LVEF 与 LV-GRS 呈高度正相关；f)LVEF 与 LV-GCS 呈高度负相关；g)LVESVi 与 LV-GRS 呈高度负相关；h)LVESVi 与 LV-GCS 呈高度正相关；i)LVESVi 与 LV-GLS 呈轻度正相关。

能够满足日常生理需求，运动时左心室射血分数快速上升、心率增快，为心输出量的快速增加提供了储备。长期高强度耐力运动增加了马拉松运动员的迷走神经张力，降低了交感神经张力<sup>[13]</sup>，导致肾上腺素和去甲肾上腺素分泌减少，从而使静息心率降低。

Prakken 等<sup>[14]</sup>发现运动员的左心室心肌质量显著高于非运动员，在本研究中业余马拉松运动员的左心室心肌质量也显著高于对照组，此外还发现 LVMI、LVEDVi、LVESVi、RVEDVi 和 RVESVi 均高于对照组，与 Wang 等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。长期耐力运动训练会诱发心肌细胞肥大，从而增加心肌跨桥和成肌纤维的形成，从而导致左心室心肌质量增加<sup>[10,15]</sup>。进行马拉松跑期间，静脉回流增加，持续的容量过载可能是 LVEDVi 升高的原因；运动期间血管阻力增加引起肺动脉压力增高，进而导致收缩末期右心室壁压升高，随

着运动强度的增加和时间的延长，右心室壁长期高压引起右心室收缩能力的降低，这可能是导致 RVESVi 升高的原因<sup>[9,16]</sup>。

心脏的复杂运动由心肌纤维的运动决定。心肌收缩可根据所涉及的心肌进行分类：心内膜下层的纤维从心底到心尖呈纵向排列，主要决定纵向应变；心外膜下层的纤维从心尖到心底呈斜向排列，主要决定周向应变；心肌中间层的纤维呈环状分布，肌纤维层共同作用影响心肌扭转力即径向应变<sup>[17]</sup>。周向和纵向应变为负值，反映心肌缩短、变薄和/或收缩，而径向应变则为正值，因为它反映了心肌伸长、增厚和/或松弛。我们观察到 LV-GCS 和 LV-GRS 降低，这些结果似乎与早期的研究结果基本相一致，因为优秀运动员在静息状态下的 LV 收缩能力提高，收缩持续时间显著缩短，且 LV 排空速度显著增加<sup>[18]</sup>，所以 LV-GCS 和 LV-

GRS 降低。此外,我们还观察到 LV 基底段和中间段的径向应变、中间段及心尖的周向应变减小。关于训练诱导的区域特异性功能改变的机制目前还没有确定的说明,但可能包括结构重塑或建筑纤维排列、负荷条件改变或心肌细胞和分子的内在适应<sup>[19]</sup>。在本研究中,两组之间 LV-GLS 的差异并无统计学意义,可能与 LVEF 维持正常有关,本研究中发现 LVEF 的增加与 GLS 和 GCS 的增加有关,也证明了心肌的区域代偿以维持 LVEF 的正常水平<sup>[9]</sup>。

关于运动员右心室重构的研究很少,有研究者发现耐力运动引起的重塑在右心室更明显<sup>[16,20]</sup>。由于心动过缓导致的前负荷增加和舒张期充盈时间延长均会导致右心室扩张及右心室壁应力改变<sup>[21]</sup>。在本研究中,运动员组的 RV-GLS 减小,纵向应变降低并不一定表明右心室收缩功能障碍,本研究中运动员组的 LVMI、RVEDVi 和 RVESVi 增高,这些结果提示心脏结构重塑伴随着 RV-GLS 的降低,由于形态和局部曲率半径的差异,右心室基底段更容易受到容量负荷过大时管壁应力增加的影响,因此更容易发生优先扩张和应变减小<sup>[22-23]</sup>,从而导致 RV-GLS 减小,这一结果反映了运动员对血流动力学变化的调节和储备功能增强。在运动时,心率的简单增加或右心室应变的轻微增加会导致每搏输出量的增加,而静息时较小的应变能提供更大的潜在收缩储备,我们的结论和既往的研究结论一致<sup>[22]</sup>。因此,静息状态下 RV-GLS 的减小可能是运动员心脏功能变化的一个重要标志。我们的研究还显示运动员组与对照组之间 RV-GCS 和 RV-GRS 的差异无统计学意义,这与之前的研究结果有所不同,如 Lakatos 等<sup>[24]</sup>基于超声技术研究发现运动员的 RV-GCS 显著降低。目前,对 RV-GLS 的研究结果也不尽相同,如一项研究发现运动员的 RV-GLS 增加<sup>[21]</sup>,而 Chen 等<sup>[8]</sup>的研究中发现 RV-GLS 在运动员与对照组之间并无显著差异。可能的原因:右心室的解剖结构和位置复杂;FT 技术供应商的差异<sup>[25]</sup>;运动员的异质性;cMRI-FT 技术与超声心动图斑点追踪技术两种应变测量方法的原理不同,因此两种方法测量的右心室应变值差异大。

我们还发现,业余马拉松运动员的 LVEDV 和 RVEDV 与每周训练量显著相关,Hu 等<sup>[13]</sup>的研究中发现业余马拉松运动员早期时右心室容积与平均训练量呈显著正相关,这是运动员适应耐力运动的一种生理现象<sup>[26]</sup>。这一结果充分反映了业余马拉松运动员右心室重塑的内在生理特点<sup>[27]</sup>,我们推测 LVEDV 与每周训练量的相关性同样说明了耐力运动之下的左心室生理性适应。

本研究有一定的局限性:①样本量较少,可能存在

选择偏倚,需在今后增加样本量进一步验证实验结果;②本研究中排除了有心血管疾病和糖尿病的运动员,限制了其普遍性;③本研究中仅评估了静息状态下的心脏功能及应变。为了全面了解心脏重塑的情况,也应在运动状态下分析心脏的功能及应变,尚需在今后的研究中进一步完善;④本研究中采用的是横断面研究,因此对运动员心室力学的时间变化仍不清楚。

综上所述,长期耐力训练会导致心脏重塑,在左室射血分数正常的情况下,业余马拉松运动员左、右心室部分收缩及舒张功能升高,左、右心室心肌应变力减低,这可能是心室对耐力运动的良好适应。cMRI-FT 技术是评价心肌变形的可靠手段,能够全面识别心肌的细微变化。

#### 参考文献:

- [1] Fabian A, Ujvari A, Tokodi M, et al. Biventricular mechanical pattern of the athlete's heart: comprehensive characterization using three-dimensional echocardiography [J]. Eur J Prev Cardiol, 2022, 29(12): 1594-1604.
- [2] Swoboda PP, Erhayiem B, Mcdiarmid AK, et al. Relationship between cardiac deformation parameters measured by cardiovascular magnetic resonance and aerobic fitness in endurance athletes [J/OL]. J Cardiovasc Magn Reson, 2016, 18(1): e48 [2016 Aug 17]. <http://dx.doi.org/10.1186/s12968-016-0266-x>.
- [3] 马运婷,郑月,赵晓莹,等.非酒精性脂肪肝病 MR mDixon 脂肪分数与左室心肌应变的相关性:早期心功能改变探索[J].放射学实践,2023,38(3):279-284.
- [4] 朱乐怡,王艺宁,赵世华,等.2021 心血管磁共振研究进展[J].放射学实践,2023,38(5):656-661.
- [5] Amaulescu M MS, de Craene M, Langet H, et al. Myocardial strain imaging: review of general principles, validation, and sources of discrepancies[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2019, 20(6): 605-619.
- [6] Gao C, Liang C, Zhang J, et al. The correlation between myocardial resilience after high-intensity exercise and markers of myocardial injury in swimmers[J/OL]. Medicine (Baltimore), 2021, 100(36): e27046 [2021 Sep 10]. <http://dx.doi.org/10.1097/MD.0000000000027046>.
- [7] Vitiello D, Palacin F, Poinsard L, et al. Marathon-induced cardiac fatigue:a review over the last decade for the preservation of the athletes' health[J/OL]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(16): e8676 [2021 Aug 17]. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph18168676>.
- [8] Chen H, Warncke ML, Muellerleile K, et al. Acute impact of an endurance race on biventricular and atrial myocardial strain in competitive male and female triathletes evaluated by feature-tracking CMR[J]. Eur Radiol, 2022, 32(5): 3423-3435.
- [9] Li YS, Ao YW, Zhu DY, et al. Reduced myocardial strain of interventricular septum among male amateur marathon runners;a cardiac magnetic resonance study[J]. J Sci Med Sport, 2023, 26(10): 506-513.
- [10] Parry-Williams G, Sharma S. The effects of endurance exercise on the heart: panacea or poison[J]. Nat Rev Cardiol, 2020, 17

- (7):402-412.
- [11] 郭歌,尹慧敏,邓湘宁,等.应用心脏磁共振特征追踪技术评价篮球和举重运动员心肌应变[J].中国运动医学杂志,2020,39(5):358-362.
- [12] Danielian A, Shah AB. Differentiating physiology from pathology: the gray zones of the athlete's heart[J]. Clin Sports Med, 2022, 41(3): 425-440.
- [13] Hu S, Zhang H, Ma H, et al. Assessment of right ventricular structure and systolic function in amateur marathon runners using three-dimensional speckle tracking echocardiography[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2023, 39(8): 1473-1482.
- [14] Prakken NH, Velthuis BK, Teske AJ, et al. Cardiac MRI reference values for athletes and nonathletes corrected for body surface area, training hours/week and sex[J]. Eur J Cardiovasc Prev Rehabil, 2010, 17(2): 198-203.
- [15] Wang Z, Song T, Yu D, et al. Correlation analysis of epicardial adipose tissue and ventricular myocardial strain in Chinese amateur marathoners using cardiac magnetic resonance[J/OL]. PLoS One, 2022, 17(9): e0274533 [2022 Sep 13]. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0274533>.
- [16] La Gerche A, Heidbüchel H, Burns AT, et al. Disproportionate exercise load and remodeling of the athlete's right ventricle[J]. Med Sci Sports Exerc, 2011, 43(6): 974-981.
- [17] Zlibut A, Cojocaru C, Onciu S, et al. Cardiac magnetic resonance imaging in appraising myocardial strain and biomechanics: a current overview[J/OL]. Diagnostics (Basel), 2023, 13 (3): e553 [2023 Feb 2]. <http://dx.doi.org/10.3390/diagnostics13030553>.
- [18] Malek LA, Mazurkiewicz L, Marszalek M, et al. Deformation parameters of the heart in endurance athletes and in patients with dilated cardiomyopathy——A cardiac magnetic resonance study[J/OL]. Diagnostics (Basel), 2021, 11(2): e374 [2021 Feb 22]. <http://dx.doi.org/10.3390/diagnostics11020374>.
- [19] Dawkins TG, Curry BA, Wright SP, et al. Right ventricular function and region-specific adaptation in athletes engaged in high-dynamic sports: a meta analysis[J/OL]. Circ Cardiovasc Imaging, 2021, 14(5): e012315 [2021 May 17]. <http://dx.doi.org/10.1161/circimaging.120.012315>.
- [20] Fagard R. Athlete's heart[J]. Heart, 2003, 89(12): 1455-1461.
- [21] Ujka K, Bastiani L, D' Angelo G, et al. Enhanced right-chamber remodeling in endurance ultra-trail athletes compared to marathon runners detected by standard and speckle-tracking echocardiography[J/OL]. Front Physiol, 2017, 8: e527 [2017 Jul 25]. <http://dx.doi.org/10.3389/fphys.2017.00527>.
- [22] Sitges M, Merino B, Butakoff C, et al. Characterizing the spectrum of right ventricular remodelling in response to chronic training[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2017, 33(3): 331-339.
- [23] Teske AJ, Prakken NH, de Boeck BW, et al. Echocardiographic tissue deformation imaging of right ventricular systolic function in endurance athletes[J]. Eur Heart J, 2009, 30(8): 969-977.
- [24] Lakatos BK, Kiss O, Tokodi M, et al. Exercise-induced shift in right ventricular contraction pattern: novel marker of athlete's heart[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2018, 315(6): 1640-1648.
- [25] Yang W, Xu J, Zhu L, et al. Myocardial strain measurements derived from MR feature-tracking: influence of sex, age, field strength, and vendor[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2024, 17 (4): 364-379.
- [26] Popple E, George K, Somauroo J, et al. Right ventricular structure and function in senior and academy elite footballers[J]. Scand J Med Sci Sports, 2018, 28(12): 2617-2624.
- [27] D'Ascanio F, Pisicchio C, Caselli S, et al. RV remodeling in olympic athletes[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2017, 10 (4): 385-393.

(收稿日期:2023-01-29 修回日期:2024-05-12)