



血流向量成像技术评价优秀女子冰球运动员左心室血流动力学特征研究

张剑梅¹, 白美英², 张瑞平¹, 杨萍³, 范煜东^{4*}

(1. 国家体育总局运动医学研究所 运动医务监督研究中心, 北京 100061;

2. 吉林省体育系统运动创伤医院 康复科, 吉林 长春 130022;

3. 成都体育学院 体育学博士后流动站, 四川 成都 610041;

4. 北京应急总医院 心血管内科, 北京 100028)

摘要:目的:探讨经长期高强度训练的优秀女子冰球运动员心脏左心室内舒张期涡流变化。方法:对19例优秀青年女子冰球运动员(运动员组)及19例健康青年女性(对照组)进行常规经胸超声心动图检查,应用血流向量成像技术(vector flow mapping, VFM)在心尖三腔心视图下观察舒张早期(V1)、舒张晚期(V2)内涡流旋转方向、位置、相对持续时间和相对大小。结果:1)常规超声心动图参数:运动员组与对照组相对室壁厚度(relative wall thickness, RWT)、左心室后壁舒张末期厚度(posterior wall thickness in diastole, PWTd)、左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、左心室缩短分数(left ventricular fractional shortening, LVFS)、二尖瓣舒张晚期血流峰值速度(A)均无统计学差异($P>0.05$);与对照组相比,运动员组室间隔舒张末期厚度、左心室质量、左心室质量指数、左心室舒张末期内径、左心室舒张末期容积、左心室收缩末期容积、舒张早期(E)、E/A(E/A比值)、每搏输出量、心输出量等测量值均增大,差值有统计学意义($P<0.05$);经体表面积标准化后,两组的左心室舒张末期容积和搏出量仍具有统计学意义($P<0.05$)。2)VFM参数:运动员组和对照组V1、V2时期内涡流位置、方向、相对大小均无显著性差异($P>0.05$),但两组V1、V2涡流相对持续时间有显著性差异($P<0.05$);3)相关性分析:运动员组V2-涡流相对大小与V1-涡流相对大小、左心室舒张末期内径、左心室舒张末期容积、搏出量呈正相关性($P<0.05$)。结论:1)参加长期高强度训练的优秀女子冰球运动员的心脏结构表现出正常的运动适应性改变,收缩和舒张功能良好;2)优秀女子冰球运动员左心室舒张期涡流持续时间延长,使多向的血流融合而不产生过多的能量损耗,保证左心室容积在充盈压不显著增加的情况下增大,有利于腔室顺应性,有助于运动员比赛期间在平均做功心率 $>90\% HR_{max}$ 的情况下能够充分确保回心血量,提升高强度运动时心肌射血能力,最大程度满足运动时机体的能量需求。

关键词:血流向量成像;冰球运动员;涡流;心脏功能

中图分类号:G804.5

文献标识码:A

冰球是一项快速滑行与高对抗性相结合的竞技类运动,需要运动员具备良好的有氧耐力和无氧能力,这就要求运动员的心脏能够承受更大的容量负荷和压力负荷,以满足机体最大的耗氧和耗能(Douglas et al., 2019; Montgomery, 1988; Spiering et al., 2003)。因此,长期的高强度训练会导致心脏重塑,出现心脏结构、功能和电生理改变(Yang et al., 2023)。既往研究表明,冰球运动员左心室(left ventricular, LV)舒张末期容积在训练早期显著增加,而射血分数没有显著改变,表明冰球运动员心脏适应性是结构性的而非功能性的(高璨等, 2020, 1980; 莫轶等, 2018; Paterick et al., 2014)。但仅依据这些参数并不能全面评价运动员的心脏功能,因此,近年来,有研

究指出,联合左心室内血流动力学的变化进行综合分析可以更为准确、客观、全面地评价心脏功能,左心室内血流动力学与心脏功能之间的必然联系,可能为阐释运动性心脏功能改变的机制提供关键理论基础(刘蕊等, 2012; 时嘉欣, 2014; Bermejo et al., 2014; Martínez-Legazpi et al., 2014)。血流向量成像(vector flow mapping, VFM)

收稿日期:2023-07-23; 修订日期:2023-09-29

基金项目:科技部国家重点研发计划“主动健康和人口老龄化科技应对”重点专项(2022YFC2010200)。

第一作者简介:张剑梅(1975-),女,主任医师,硕士,主要研究方向为运动员心肺机能评定,E-mail:zjm13071156806@163.com。

*通信作者简介:范煜东(1972-),男,副主任医师,硕士,主要研究方向为心血管疾病的诊断与治疗,E-mail:fanyudongy@sina.com.cn。

技术能够可视化评估心腔中复杂的流体效应,特别是心腔内涡流的变化,可以为评估和监测心功能提供可靠的参考(程冠等,2021;张瑜等,2015;Rodríguez Muñoz et al., 2015)。因此,本研究利用VFM技术对比高水平女子冰球运动员和普通健康女性左心室舒张期涡流参数,分析讨论优秀冰球运动员特有的心脏结构和功能表现,以期为运动训练过程中的心脏功能监控、科学制定训练方案以及科学选材提供有效参考。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

本研究运动员组为19名备战2022年冬季冬奥会的优秀女子冰球运动员,训练年限 ≥ 5 年,运动等级为一级运动员及以上,近半年每周训练时间 ≥ 24 h。招募19名无规律运动习惯的普通健康女性作为对照组,纳入标准为每周进行规律运动的时间 < 3 h。排除标准为患有高血压、器质性心脏病或者有药物、吸烟、饮酒史等。两组受试者在年龄、身高、体重方面无显著性差异(表1)。本研究经国家体育总局运动医学研究所伦理委员会(2021-15)批准,并获得所有参与者的书面知情同意,在运动员医务监督和健康体检期间自愿参加2021年4月至2022年1月的心脏机能评估研究,研究流程符合赫尔辛基宣言。

表1 运动员组和对照组受试者基本情况

参数	M \pm SD		P
	运动员(n=19)	对照组(n=19)	
年龄/岁	25.16 \pm 3.70	24.26 \pm 2.16	0.370
体重/kg	64.13 \pm 5.54	60.21 \pm 7.32	0.071
身高/m	1.68 \pm 0.34	1.66 \pm 0.49	0.135
BMI/(kg/m ²)	22.81 \pm 1.75	21.96 \pm 2.37	0.217

注: BMI, 身体质量指数(body mass index)。

1.2 研究方法

1.2.1 基本资料收集

测量并记录安静状态下所有受试者的身高、体重、体表面积(body surface area, BSA)、BMI、舒张压(diastolic blood pressure, DBP)、收缩压(systolic blood pressure, SBP)及心率(heart rate, HR)等参数。

1.2.2 超声心动图检查

采用日本东芝阿洛卡(Aloka Iesendo 880)超声系统(Hitachi Aloka Medical Ltd., 日本), 配备超宽频相控阵S121探头, 该设备内部配有VFM分析软件。所有受试者的超声心动图检查均在晨起空腹进行, 由一名经验丰富的医生操作。运动员组数据的采集在集中训练期的常规医务监督期间的休息日(训练后24 h之内)进行, 对照组的数据采集在常规健康体检时完成。

1.2.2.1 常规超声检查

所有受试者接受全面的二维静息超声心动图检查。受检者左侧卧位, 平静呼吸, 同步三导联心电图: 1)应用M型超声检查测量左心室舒张末期内径(left ventricular end-diastolic dimension, LVEDD)、左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、室间隔舒张末期厚度(interventricular septal thickness in diastole, IVSd)、左心室后壁舒张末期厚度(posterior wall thickness in diastole, PWTd)、左心室舒张末期容积(left ventricular end-diastolic volume, LVEDV)、左心室缩短分数(left ventricular fractional shortening, LVFS)、左心室收缩末期容积(left ventricular end-systolic volume, LVESV)、每搏输出量(stroke volume, SV)、心输出量(cardiac output, CO); 2)计算左心室质量(left ventricular mass, LVM)、左心室质量指数(left ventricular mass index, LVMI)、相对室壁厚度(relative wall thickness, RWT); 3)应用脉冲多普勒超声检查测量二尖瓣口舒张早期(peak early diastolic transmitral flow velocity, E峰)、晚期(peak late diastolic transmitral flow velocity, A峰)跨瓣血流速度峰值, 计算E/A比值。

1.2.2.2 VFM

采集2个心动周期的LV心尖三腔心的彩色多普勒图像, 使用5~8 mHz彩色流动图像在线分析。1)先选择1个心动周期进行分析, 确定2个连续的QRS波群作为起点和终点。在A3C视图下, 在二尖瓣下2 cm处划一条取样线, 得到一个心动周期的时间-流量曲线(图1), 确定RR间期。2)再结合心电图、瓣膜开闭选择左心室舒张早期(V1, 二尖瓣打开到心房收缩之前)和舒张晚期(V2, 心房收缩开始到二尖瓣关闭)确定舒张期的时相所在帧数。在等容舒张期手动描记LV内膜边界, 软件自动追踪其余时相下的内膜边界, 同时跟踪LV内的所有涡流, 手动导出V1、V2时相下持续存在的最大稳定涡流。在二维平面上观察到的循环量的正负值代表涡流方向, 即负值为顺时针方向、正值为逆时针方向。3)将LV感兴趣区(region of interest, ROI)分为4个象限: 在LV心尖三腔心平面上, 从心尖的中心到二尖瓣和主动脉瓣交界处的纵向直线将ROI分为左右两部分, 垂直于第一条纵向直线的中点的水平线将ROI分为上下两部分。4)将所得到的4个象限分别定义为基底前段(AB)、基底后段(PB)、心尖前段(AA)和心尖后段(PA)(Rodríguez Muñoz et al., 2015), 以方便记录最大稳定涡流所在位置(图2)。

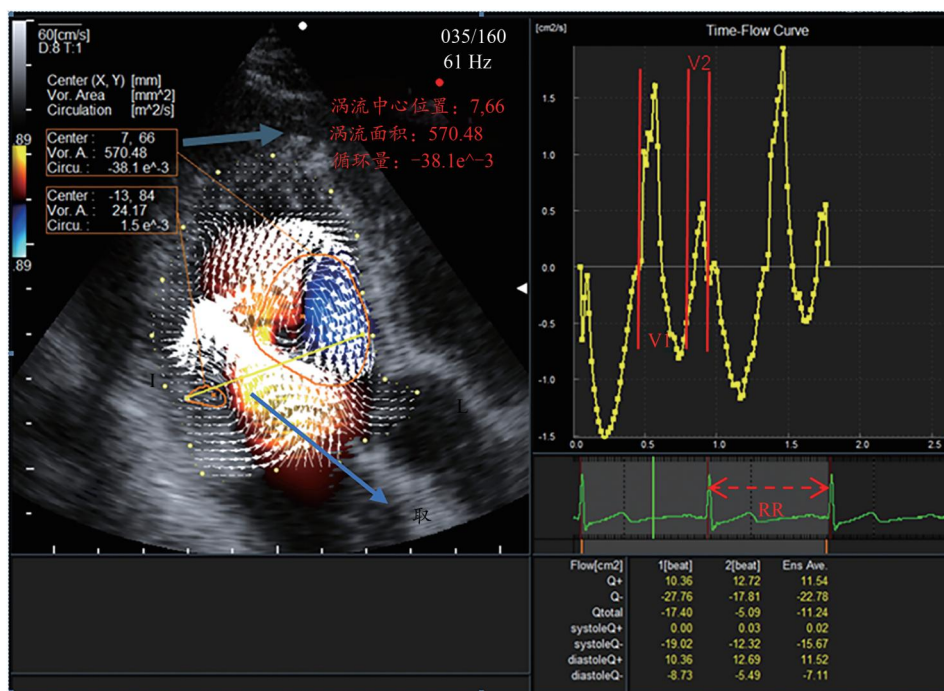
本研究纳入的最大稳定涡流的主要参数为: 1)相对持续时间/%, V1、V2时相中分别持续存在的稳定涡流的第一帧到最后一帧为该涡流存在的持续时间, 为了消除涡流持续时间对心率的依赖性, 将“涡流持续时间/RR”的比率作为相对持续时间进行分析; 2)相对大小/%, 逐帧选择每个时相中连续存在的稳定涡流的最大面积, 为了消

除涡流面积对LV面积的依赖性,与LV面积的比率(涡流最大面积/LV面积)作为相对大小进行分析。

1.2.3 统计学方法

所有连续变量均以均数±标准差($M \pm SD$)表示。采用Shapiro-Wilk检验分析所有连续变量的正态分布情况($P > 0.05$ 为正态分布);运动员组和对照组数据的比较,

根据数据类型分别采用独立样本 t 检验(正态分布、方差齐)、 t' 检验(正态分布、方差不齐)和Mann-Whitney U检验(非正态分布);符合双变量正态分布的数据采用Pearson相关分析,否则采用Spearman相关分析评估各参数之间的相关性。 $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。



注:V1为舒张早期,二尖瓣打开到心房收缩之前;V2为舒张晚期,心房收缩开始到二尖瓣关闭;VFM软件中以向量图方式显示血流分布特点,箭头表示流动方向和强度;LA为左心房(left atrial),LOVT为LV流出道,RR为一个心动周期。

图1 时间-流量曲线示意

Figure 1. Time-Flow Curves

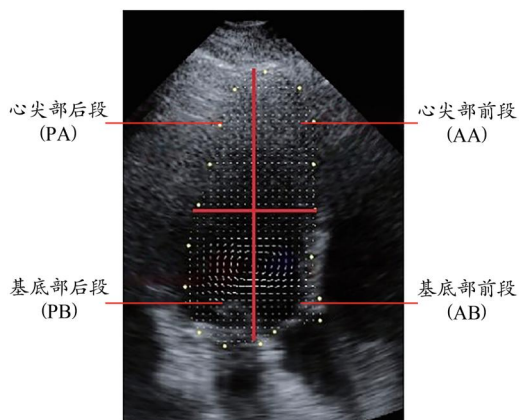


图2 左心室的4个象限示意

Figure 2. Four Quadrants of the Left Ventricle

2 结果

2.1 基础指标比较

两组受试者的BMI和SBP比较无统计学意义($P > 0.05$);与对照组相比,运动员组的BSA增加,HR、DBP降低,差异均有统计学意义($P < 0.05$)(表2)。

2.2 常规超声心动图参数比较

与对照组相比,运动员组受试者的IVSd、LVM、LVMI、LVEDD、LVEDV、LVESV、E、E/A、SV、CO等均增大,差异均有统计学意义($P < 0.05$);PWTd、RWT、LVEF、LVFS、A等无明显统计学差异($P > 0.05$);经BSA校正后,两组的LVEDV和SV仍有统计学意义($P = 0.02, P = 0.03$)(表3)。如图3所示,运动员组大部分受试者左心室几何结构在正常范围内,有3名运动员心脏表现呈离心性肥厚(LVMI增加,RWT正常,即超出红色垂直线条区域)。

2.3 左心室内涡流行为比较

涡流是一种围绕虚拟中心轴做圆周运动或旋转运动的流体结构。本研究关注的是心脏舒张早期(V1)和舒张晚期(V2)在左心室基底前段(AB)二尖瓣前叶下方出现的顺时针涡流,它在心动周期中持续时间较长,有助于优化心脏做功,而在左心室基底后段(PB)二尖瓣后叶处的逆时针涡流则呈现出快速消散和低强度的特征(图4)。运动员组和对照组受试者在V1、V2出现的涡流的方向、位置、相对大小无统计学差异($P > 0.05$);涡流相

对持续时间的差异有明显统计学意义($P < 0.05$)(表4)。

2.4 左心室涡流参数与常规超声参数、基础指标的相关性分析

对运动员组受试者的参数进行双变量相关分析发现,

V2-涡流相对大小与LVEDD、LVEDV和SV呈正相关($P < 0.05$), 而对照组受试者的涡流相对大小和持续时间与LVEDD、LVEDV和SV无显著相关性($P > 0.05$)(表5)。

表2 运动员组和对照组受试者基础指标比较

Table 2 Comparison of Basic Indicators between the Athlete Group and the Control Group

$M \pm SD$

参数	运动员组($n=19$)	对照组($n=19$)	P	统计学方法
HR/(次/分)	66.68 \pm 6.58	73.88 \pm 11.34	0.022	t 检验
BMI/(kg/m ²)	22.81 \pm 1.75	21.96 \pm 2.37	0.217	Mann-Whitney U 检验
BSA/m ²	1.81 \pm 0.08	1.67 \pm 0.97	<0.001	t 检验
SBP/mmHg	112.68 \pm 9.14	111.84 \pm 5.41	0.732	t 检验
DBP/mmHg	66.79 \pm 7.39	75.58 \pm 7.26	0.001	t 检验

表3 运动员组与对照组常规超声心动图参数比较

Table 3 Comparison of Conventional Echocardiographic Parameters between the Athlete Group and the Control Group

$M \pm SD$

参数	运动员组($n=19$)	对照组($n=19$)	P	统计学方法
RWT	0.37 \pm 0.48	0.37 \pm 0.45	0.795	Mann-Whitney U 检验
LVM/g	152.42 \pm 27.79	117.84 \pm 22.26	<0.001	Mann-Whitney U 检验
LVMI/(g/m ²)	84.45 \pm 15.45	70.24 \pm 11.26	0.003	t 检验
IVSd/mm	9.22 \pm 0.97	8.17 \pm 0.87	0.001	t 检验
PWTd/mm	8.76 \pm 0.79	8.49 \pm 0.92	0.342	t 检验
LVEDD/mm	48.71 \pm 2.77	44.41 \pm 2.55	<0.001	Mann-Whitney U 检验
LVEDV/mL	111.63 \pm 15.02	89.21 \pm 11.36	<0.001	Mann-Whitney U 检验
LVESV/mL	34.89 \pm 7.50	27.63 \pm 8.43	0.008	Mann-Whitney U 检验
SV/mL	76.74 \pm 9.45	61.58 \pm 8.57	<0.001	t 检验
CO/L	5.12 \pm 0.78	4.36 \pm 1.23	0.029	t 检验
LVEF/%	68.94 \pm 3.58	69.29 \pm 6.34	0.834	t 检验
LVFS/%	39.08 \pm 3.53	39.00 \pm 5.02	0.956	t 检验
E/(cm/s)	90.76 \pm 15.49	79.68 \pm 13.46	0.024	Mann-Whitney U 检验
A/(cm/s)	48.47 \pm 11.64	49.11 \pm 12.23	0.871	t 检验
E/A	1.95 \pm 0.46	1.68 \pm 0.34	0.046	t 检验

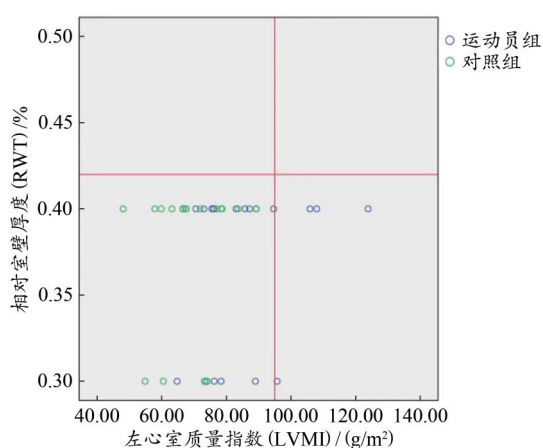


图3 运动员组和对照组受试者的左心室结构分布

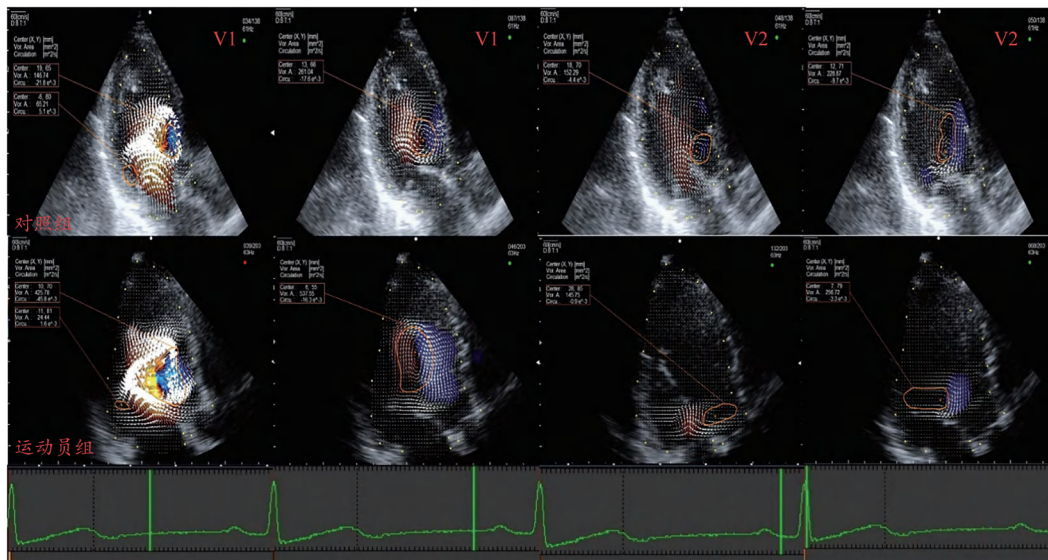
Figure 3. Distribution of Left Ventricular Structures in Subjects in the Athlete and Control Groups

3 讨论

通过对女子冰球运动员和普通健康女性的心脏结构进行对比发现, 相较于对照组, 运动员组的LVM和LVMI较大, 且部分女子冰球运动员的PWTd略有增加, 但尚未超过12 mm。2016年美国超声心动图协会(American Society of Echocardiography, ASE)和欧洲心血管影像协会(European Association of Cardiovascular Imaging, EACVI)发布的成人心脏腔室定量指南根据RWT和LVM将左心室几何结构分为4类: 正常结构(LVM正常/RWT正常)、向心性肥厚(LVM增加/RWT增加)、离心性肥厚(LVM增加/RWT正常)和向心性重构(LVM正常/RWT增加); RWT > 0.42被认为增厚; 男性LVMI(LVM/BSA) > 115 g/m²、女性LVMI(LVM/BSA) > 95 g/m²被认为LVM增加(Lang et al.,

2015)。依据这一标准,本研究运动员组大部分受试者左心室几何结构在正常范围内,仅有3名运动员心脏表现呈离心性肥厚(图3)。这可能与冰球是一项高强度动态性(>70%VO_{2max})和中等强度静态性(20%~50%MVC)相结合的运动这一项目特点有关(Levine et al., 2015),长期高强度动态运动使心肌收缩力增强,心输出量增加以及外周血管阻力降低(Kovacs et al., 2016)。经BSA校正后,运动员组受试者的SV和LVEDV仍明显优于对照组,提

示,优秀女子冰球运动员心脏的特点体现在强大的左心室射血功能及代偿后心室腔变化方面。本研究运动员组受试者的LVFS、LVEF、E/A未见异常。该组研究数据是在运动员日常训练修整后采集的,运动员的静息心率较低符合运动员心脏的特点,较低的心率使心脏舒张期相对延长,确保运动后心脏充分供血可以使高强度运动后的心肌疲劳得到更快的恢复(Levine et al., 1991)。



注:V1为舒张早期,血液经二尖瓣口进入左心室,在二尖瓣前、后叶下方各形成一个局部涡流,前叶位置涡流为顺时针,后叶位置涡流为逆时针方向;V2为舒张晚期,经左心房收缩血液再次进入左室,在左心室基底前段形成一个顺时针方向涡流。

图4 运动员组和对照组的血流向量图

Figure 4. Blood Flow Vector Plots of the Athlete and Control Groups

表4 运动员组和对照组受试者左心室涡流参数比较

参数	V1(n=19)		V2(n=19)	
	对照组	运动员组	对照组	运动员组
涡流方向(顺时针/逆时针)	19/0	19/0	11/0	18/0
相对大小/%	15.79±8.74	15.94±5.22	8.63±8.92	11.41±4.88
相对持续时间/%	12.32±8.08	20.88±7.20*	2.33±2.75	4.58±3.28#
涡流开始位置	AB/PB PA/AA	18/1	11/0	17/0 0/1
涡流结束位置	AB/PB PA/AA	11/5 0/3	13/4 1/1	0/10 1/0

注:*表示P<0.01(运动员 vs 对照组,t检验);#表示P<0.05(运动员 vs 对照组,Mann-Whitney U检验);V1:舒张早期;V2:舒张晚期。

舒张早期左心室涡流特性是衡量心室舒张功能的标准,不受前负荷的影响,且涡量与舒张功能障碍的临床体征有关(Matsuura et al., 2019);涡流形成时间也被认为是心脏健康的评价标准之一(Belohlavek, 2012)。本研究观察到,与对照组相比,运动员组受试者的V1、V2涡流持续时间显著延长(P<0.01)。这可能与涡流在舒张期的变化规律有关:在舒张早期(V1),左心室处于主动充盈阶段,

因房室压力梯度,促进了血液从左心房(LA)通过二尖瓣口(抽吸效应)流入左心室(LV),在二尖瓣前、后叶下方形成不对称的局部涡流,二尖瓣前叶下方的涡流迅速发展并促进血液从LA到LV的运输(Martínez-Legazpi et al., 2014; Rodríguez Muñoz et al., 2015);舒张晚期(V2),因心房收缩左心室处于被动充盈阶段,在左心室基底前段二尖瓣前叶远端形成了涡流,该涡流逐步向二尖瓣下方移动,在射血前储

存能量,同时参与二尖瓣的关闭(张瑜等, 2015; Rodríguez Muñoz et al., 2015)。在血流速度增加时,涡流循环增大,随着舒张早期快速充盈结束,心室内血流速度减慢,低速的血流有助于产生最稳定、最大面积的顺时针涡流(Mele et al., 2019; Zhang et al., 2012)。本研究中优秀女子冰球运动员V1-涡流持续时间与V1-涡流相对大小呈正相关,涡流持续时间延长可以避免射入流的分散(防止碰撞和能量耗散),并同时具有输送流体的能力(涡流与射入流相互作用)(陈璐璐, 2010; Charonko et al., 2013),有助于在缓慢心率下左心室内血流的有序循环,增加心脏功能;同时,优秀女子冰球运动员V2-涡流相对大小均与V1-涡流相对大小、LVEDD、LVEDV、SV呈正相关性($P < 0.05$),可见

在舒张期涡流作为相对长期的惯性流体结构,能够使多向的血流融合而不产生过多的能量损耗并降顺应性,从而保证左心室容积在充盈压不显著增加的情况下增大,更有利于腔室顺应性,使运动员投入冰球比赛期间平均做功心率(WHR) $> 90\% HR_{max}$ 的情况下保证充足的回心血量,提高心脏射血功能,满足运动时肌肉的能量需求(Martínez-Legazpi et al., 2014; Nogami et al., 2013; Spiering et al., 2003)。另外,E/A作为评价心脏舒张功能的指标,本研究中未见异常,考虑可能是涡流持续时间增加并不意味着舒张功能障碍,这与以往心脏涡流特性的病理研究(时嘉欣, 2014; Bermejo et al., 2014; Eriksson et al., 2013)是不一致的。

表5 运动员组和对照组受试者左心室涡流参数与常规超声心动图参数、基本资料的相关性分析

Table 5 Correlation Analysis of Left Ventricular Vortex Parameters with Conventional Echocardiographic Parameters and Basic Data in the Athlete Group and Control Group

相关指标		运动员组($n=19$)				对照组($n=19$)			
		V1-vortex duration	V1-vortex size	V2-vortex duration	V2-vortex size	V1-vortex duration	V1-vortex size	V2-vortex duration	V2-vortex size
V1-vortex duration	Pearson's correlation	1	0.497	0.170	0.405	1	0.647**	-0.167	0.072
	<i>P</i>		0.030	0.151	0.085		0.003	0.495	0.768
V1-vortex size	Pearson's correlation	0.497*	1	0.343	0.627**	0.647**	1	0.194	0.440
	<i>P</i>	0.030		0.151	0.004	0.003		0.427	0.060
V2-vortex duration	Pearson's correlation	0.170	0.343	1	0.370	-0.167	0.194	1	0.829***
	<i>P</i>	0.151	0.151		0.119	0.495	0.427		0.000
V2-vortex size	Pearson's correlation	0.170	0.627**	0.370	1	0.072	0.440	0.829***	1
	<i>P</i>	0.486	0.004	0.119		0.768	0.060	0.000	
LVEDV	Pearson's correlation	0.282	0.354	0.273	0.483*	0.152	0.046	-0.179	0.034
	<i>P</i>	0.242	0.137	0.242	0.036	0.536	0.852	0.464	0.891
LVEDD	Pearson's correlation	0.269	0.349	0.260	0.480*	0.241	0.144	-0.176	0.059
	<i>P</i>	0.265	0.143	0.282	0.038	0.320	0.557	0.472	0.810
SV	Pearson's correlation	0.290	0.309	0.172	0.460*	-0.188	-0.052	-0.109	-0.009
	<i>P</i>	0.228	0.198	0.480	0.048	0.441	0.832	0.656	0.972
PWTD	Spreaman's correlation	-0.199	-0.271	-0.097	-0.466*	0.307	0.122	0.029	0.219
	<i>P</i>	0.414	0.262	0.693	0.044	0.201	0.619	0.905	0.368

注: V1-vortex duration, V1-涡流相对持续时间; V1-vortex size, V1-涡流相对大小; V2-vortex duration, V2-涡流相对持续时间; V2-vortex size, V2-涡流相对大小; *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$ 。

综上,与未经过规律训练的普通运动女性相比,长期高强度动态运动使女子冰球运动员的心脏前负荷显著增加,表现为左心室内径、舒张末期容积增加,在静息状态下,运动员仍有较高的二尖瓣瓣口血流速度峰值E峰,使舒张期涡流能够吸引多向的流体融合并降低其附近的压力,从而提高左心室充盈效率,对心脏舒张功能起到重要作用。

4 研究的局限性

研究的局限性包括研究设计、研究领域以及技术上的局限性。第一,本研究旨在描述女子冰球运动员心脏左

心室涡流行为以及与普通健康女性的差异。但因运动员群体的特殊性,样本量较少,数据并非都呈正态分布。因此,本研究结果应视为初步结果,需要更大的样本量进行进一步的确认。第二,考虑到心内涡流行为的许多机制不清楚,本研究也只关注了左心室舒张期最稳定的顺时针涡流,尽管本研究也观察到了逆时针涡流,但考虑到逆时针涡流对心功能和血流动力学的影响并不明显,没有进行分析,导致本研究的分析简化。第三,此次采样时间是在运动员日常训练结束后进行的,不排除经过大强度训练后心脏出现运动性疲劳、收缩功能短暂下降,使运动员左心室内残余血量增加,出现LVESV明显增加的情况。

第四, E/A值与LV舒张功能呈“U”形关系,难以区分正常和假性正常化类型,尤其对于LVEF正常且无其他异常改变的情况,需要再依据其他指标,如二尖瓣环处室间隔侧或侧壁舒张早期峰值运动速度 e' 、平均 E/e' 等,进行进一步评估,从而更加精确评估左心室舒张功能以及探讨变量之间的关系。第五,由于VFM技术的局限性,使用彩色多普勒作为数据源时需要手动校正速度超过设定的奈奎斯特极限的混叠,并且由于使用过滤器来避免检测组织运动中的噪声,阻碍了低流速的检测,进而导致观测平面未能观察到存在的所有流体结构。

5 结论

1)参加长期高强度训练的优秀女子冰球运动员的心脏结构表现出正常的运动适应性改变,收缩和舒张功能良好。

2)长期规律进行高强度运动训练的优秀女子冰球运动员左心室舒张期涡流持续时间延长,使多向的血流融合而不产生过多的能量损耗,保证左心室容积在充盈压不显著增加的情况下增大,有利于腔室顺应性,也有助于运动员比赛期间在平均做功心率 $>90\%HR_{max}$ 的情况下保证运动员的回心血量,提高心脏射血功能,满足运动中肌肉的能量需求。

参考文献:

陈璐璐, 2010. 血流向量图技术分析左室心腔内血流动力学特点[D]. 西安: 第四军医大学: 1-60.

程冠, 夏娟, 李菁, 等, 2021. 血流向量成像技术对心腔流体力学的研究进展[J]. 临床超声医学杂志, 23(10): 773-775.

高璨, 梁辰, 张建红, 等, 2020. 冬季项目男子残疾运动员心脏超声特点的研究[J]. 中国超声医学杂志, 36(10): 902-904.

刘蕊, 纳丽莎, 刘丽文, 等, 2012. 血流向量成像技术量化观察急性下壁心肌梗死患者舒张期左心室涡流特征[J]. 中国医学影像学杂志, 20(9): 680-683.

莫轶, 韦军, 2018. 我国运动心脏的诊断现状及进展[J]. 中国临床新医学, 11(2): 208-212.

时嘉欣, 2014. 血流向量成像技术评价梗阻性与非梗阻性肥厚型心肌病左心室内血流流场特征[J]. 中华超声影像学杂志, 23(5): 372-376.

张瑜, 丁云川, 王庆慧, 等, 2015. 血流向量成像定量评价正常成人左心室涡流特征[J]. 昆明医科大学学报, 36(10): 36-40.

BELOHLAVEK M, 2012. Vortex formation time: An emerging echocardiographic index of left ventricular filling efficiency?[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 13(5): 367-369.

BERMEJO J, BENITO Y, ALHAMA M, et al., 2014. Intraventricular vortex properties in nonischemic dilated cardiomyopathy[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 306(5): H718-H729.

CHARONKO J J, KUMAR R, STEWART K, et al., 2013. Vortices formed on the mitral valve tips aid normal left ventricular filling[J]. Ann Biomed Eng, 41(5): 1049-1061.

DOUGLAS A, ROTONDI M A, BAKER J, et al., 2019. On-Ice physical demands of world-class women's ice hockey: From training to competition[J]. Int J Sports Physiol Perform, 14(9): 1227-1232.

ERIKSSON J, BOLGER A F, EBBERS T, et al., 2013. Four-dimensional blood flow-specific markers of LV dysfunction in dilated cardiomyopathy[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 14(5): 417-424.

KOVACS R, BAGGISH A L, 2016. Cardiovascular adaptation in athletes[J]. Trends Cardiovasc Med, 26(1): 46-52.

LANG R M, BADANO L P, MOR-AVI V, et al., 2015. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: An update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging[J]. J Am Soc Echocardiogr, 28(1): 1-39.e14.

LEVINE B D, BAGGISH A L, KOVACS R J, et al., 2015. Eligibility and disqualification recommendations for competitive athletes with cardiovascular abnormalities: Task force 1: Classification of sports: Dynamic, static, and impact: A scientific statement from the American Heart Association and American College of Cardiology[J]. Circulation, 132(22): e262-266.

LEVINE B D, LANE L D, BUCKEY J C, et al., 1991. Left ventricular pressure-volume and Frank-Starling relations in endurance athletes. Implications for orthostatic tolerance and exercise performance[J]. Circulation, 84(3): 1016-1023.

MARTINEZ-LEGAZPI P, BERMEJO J, BENITO Y, et al., 2014. Contribution of the diastolic vortex ring to left ventricular filling[J]. J Am Coll Cardiol, 64(16): 1711-1721.

MATSUURA K, SHIRAISHI K, SATO K, et al., 2019. Left ventricular vortex and intraventricular pressure difference in dogs under various loading conditions[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 316(4): H882-H888.

MELE D, SMARRAZZO V, PEDRIZZETTI G, et al., 2019. Intracardiac flow analysis: Techniques and potential clinical applications[J]. J Am Soc Echocardiogr, 32(3): 319-332.

MITCHELL J H, HASKELL W, SNELL P, et al., 2005. Task Force 8: Classification of sports[J]. J Am Coll Cardiol, 45(8): 1364-1367.

MONTGOMERY D L, 1988. Physiology of ice hockey[J]. Sports Med, 5(2): 99-126.

NOGAMI Y, ISHIZU T, ATSUMI A, et al., 2013. Abnormal early diastolic intraventricular flow 'kinetic energy index' assessed by vector flow mapping in patients with elevated filling pressure[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 14(3): 253-260.

PATERICK T E, GORDON T, SPIEGEL D, 2014. Echocardiography: Profiling of the athlete's heart[J]. J Am Soc Echocardiogr, 27(9): 940-948.

RODRÍGUEZ MUÑOZ D, MOYA MUR J L, FERNÁNDEZ-GOLFÍN C, et al., 2015. Left ventricular vortices as observed by vector flow mapping: main determinants and their relation to left ventricular filling[J]. Echocardiography, 32(1): 96-105.

SPIERING B A, WILSON M H, JUDELSON D A, et al., 2003. Evaluation of cardiovascular demands of game play and practice in women's ice hockey[J]. J Strength Cond Res, 17(2): 329-333.

YANG P, ZHANG J, XUE J, et al., 2023. Time domain adaptation of left ventricular diastolic intraventricular pressure in elite female ice hockey athletes[J]. Front Cardiovasc Med, 10: 1057129.

ZHANG H B, ZHANG J, ZHU X X, et al., 2012. The left ventricular intracavitary vortex during the isovolumic contraction period as detected by vector flow mapping[J]. Echocardiography, 29(5): 579-587.

The results indicated that the cross stress adaptation hypothesis and the antagonistic stress hypothesis explained partly relationship between physical exercise and psychosocial stress. There were dual mechanism systems of physical exercise in affecting psychosocial stress, i. e., the HPA system can promote habitual adaptation of the stress response system, and the neuro-immune, emotion, physical fitness and MGBA system can increase the positive states of the stress response system. Based on the dual mechanism systems, the following physical exercise programs were suggested: Yoga, Tai Chi, Qi Gong, outdoor walking and leisure sports are recommended to relieve greater psychosocial stress; long-term regular high intensity and high amount exercise including endurance, resistance and HIIT were recommended to increase the adaptation of psychosocial stress.

Keywords: *physical exercise; psychosocial stress; cross stress adaptation; antagonistic stress*

(上接第 72 页)

Evaluation of Left Ventricular Eddy Current in Elite Female Ice Hockey Players by Using Vector Flow Mapping

ZHANG Jianmei¹, BAI Meiyong², ZHANG Ruiping¹, YANG Ping³, FAN Yudong^{4*}

1. Sports Medical Supervision Research Center, National Institute of Sports Medicine, Beijing 100061, China;

2. Rehabilitation Department, Jilin Sports System Sports Trauma Hospital, Changchun 130022, China;

3. Postdoctoral Mobile Station of Sports Science, Chengdu Sport University, Chengdu 610041, China;

4. Cardiovascular Medicine Department, Emergency General Hospital, Beijing 100028, China

Abstract: Objective: To explore the changes of left ventricular vortex in elite female ice hockey players who conducted long-term high-intensity exercise training. Methods: A total of 19 elite female ice hockey players (athlete group) and 19 healthy young women (control group) were examined by transthoracic echocardiography, the vector flow mapping (VFM) technology was executed to calculate the rotation direction, position, relative duration and relative size of the vortex at the early diastolic phase (V1) and late diastolic phase (V2) under the apical three-chamber view. Results: 1) No significant difference was observed in RWT, PWTd, LVEF, LVFS, and A between the two groups ($P>0.05$); compared with the control group, the IVSd, LVM, LVMI, LVEDD, LVEDV, LVESV, E, E/A, SV and CO were increased in the athlete group ($P<0.05$); standardized by BSA, the significant difference was still observed in LVEDV and SV between the two groups ($P<0.05$). 2) There was no significant difference in position, direction, and relative size of vortex at V1 and V2 between the two groups ($P>0.05$); however, the relative duration of vortex was significant different at V1 and V2 between the two groups ($P<0.05$). 3) The relative size of vortex at V2 was highly correlated with relative size of vortex at V1, LVEDD, LVEDV, and SV ($P<0.05$). Conclusion: 1) The cardiac structure of female ice hockey players shows normal exercise adaptation, the cardiac systolic and diastolic functions are good. 2) The duration of the left ventricular diastolic vortex in elite female ice hockey players is prolonged, which enables the fusion of multi-directional blood flow without excessive energy loss, and increases the left ventricular volume without significant increase in filling pressure. The abovementioned changes are conducive to ventricular compliance and diastolic function, and helpful to ensure the return blood volume under the condition of average working heart rate (WHR) $>90\%HR_{max}$, improving the cardiac ejection function and benefit the muscle energy demand during exercise.

Keywords: *vector flow mapping; ice hockey; vortex behavior; cardiac function*