·临床研究·

超声血流向量成像评价继发孔型房间隔缺损右室流场及能量损耗的研究

张 键 丁云川 陈 剑 侯宗柳 苏 璇 李建华 张 瑜 王庆慧

摘 要 目的 应用超声血流向量成像(VFM)技术评估继发孔型房间隔缺损(ASD)患者右室流场和能量损耗的变化规律,为定量评估ASD右室结构和功能提供参考依据。**方法** 选取继发孔型ASD患者97例,根据所测肺动脉收缩压分为无肺动脉高压(PAH)组30例(肺动脉收缩压≤30 mm Hg)、轻度PAH组25例(30 mm Hg<肺动脉收缩压≤50 mm Hg)、中度PAH组22例(50 mm Hg<肺动脉收缩压≤70 mm Hg)和重度PAH组20例(肺动脉收缩压>70 mm Hg);另选健康志愿者29例为正常对照组。应用VFM技术测量并比较各组右室涡流参数和能量损耗大小,分析右室整体能量损耗与右心功能参数的相关性。**结果** 对照组、无PAH组、轻度PAH组均显示在舒张早期的快速充盈期(P1)、舒张中期(P2)三尖瓣口存在较多涡流。正常对照组与无PAH组各时相的涡旋面积、循环强度、涡旋数量、能量损耗值比较差异均无统计学意义;轻度PAH组、中度PAH组、重度PAH组上述各参数随着肺动脉压的升高逐渐增大;能量损耗峰值均出现在P1期(均$P<0.05$)。相关性分析结果显示:P1期能量损耗值分别与Tei指数、三尖瓣E峰流速(E)及其与三尖瓣环速度(e)比值均呈正相关($r=0.768$、0.941、0.937,均$P<0.05$),与三尖瓣环收缩期位移、右室面积变化率、e均呈负相关($r=-0.864$、-0.734、-0.817,均$P<0.05$)。**结论** VFM技术可以评价ASD患者右室内流场运动和能量损耗的变化规律,为定量评估继发孔型ASD右室流体力学变化、肺动脉压大小及右室能量损耗的应用分析提供有力的依据。

关键词 超声心动描记术;血流向量成像;房间隔缺损;肺动脉高压;流场;能量损耗

[中图法分类号]R540.45;R541.1 [文献标识码]A

Evaluation of right ventricular flow field and energy loss in secundum atrial septal defect by ultrasonic vector flow mapping

ZHANG Jian, DING Yunchuan, CHEN Jian, HOU Zongliu, SU Xuan, LI Jianhua, ZHANG Yu, WANG Qinghui

Department of Ultrasound, Kunming Yan'an Hospital, Kunming 650051, China

ABSTRACT Objective To evaluate the changes of right ventricular flow field and energy loss (EL) in secundum atrial septal defect (ASD) by vector flow mapping (VFM), and to provide a reference for quantitative assessment of right ventricular structure and function in ASD. **Methods** A total of 97 patients with ASD were divided into non PAH group (30 patients, pulmonary artery systolic pressure≤30 mm Hg, 1 mm Hg=0.133 kPa), mild PAH group (25 patients, 30 mm Hg<pulmonary artery systolic pressure≤50 mm Hg), moderate PAH group (22 patients, 50 mm Hg<pulmonary artery systolic pressure≤70 mm Hg) and severe PAH group (20 patients, pulmonary artery systolic pressure>70 mm Hg). 29 healthy volunteers were enrolled as control group. Right ventricular vortex parameters and EL were measured by VFM, and the correlation between right ventricular global EL and right ventricular parameters were analyzed. **Results** There were more vortices near the tricuspid valve orifice during P1 and P2 among control group, non PAH group and mild PAH group. Between moderate PAH group and severe PAH group, there were different sizes, directions and numbers of vortices in right ventricle at different time phases of cardiac cycle. There were no significant differences in vortex area, circulation, vortex quantity and EL between control group and non PAH group at each phase, despite which increased with the increases of PAH pressures among mild group, moderate group and severe PAH group ($P<0.05$), and EL peak appeared during P1. EL was positively correlated with Tei index, E and E/e,

基金项目:国家自然科学基金项目(81460268);云南省心血管超声临床研究中心项目(2017NS330)

作者单位:650051 昆明市延安医院超声医学科 云南省心血管疾病重点实验室 云南省心脏疾病临床医学中心

通讯作者:王庆慧,Email:wqh962099@163.com

respectively (r=0.768, 0.941, 0.937, all P<0.05) and negatively correlated with TAPSE, RVFAC and e, respectively (r=−0.864, −0.734, −0.817, all P<0.05). **Conclusion** VFM imaging technology can evaluate the characteristics of flow field and EL of right ventricular blood flow in ASD, which can provide a reference for quantitative assessment of right ventricular hemodynamics and PAH pressure, and application analysis of right ventricular EL in ASD.

KEY WORDS Echocardiography; Vector flow mapping; Atrial septal defect; Pulmonary arterial hypertension; Flow field; Energy loss

右室功能的评价在心肺疾病的治疗指导和预后评估中至关重要，但目前对右室结构和体积参数的评估可能落后于疾病的发展和治疗[1]。房间隔缺损（atrial septal defect，ASD）是最常见的成人先天性心脏病之一。继发孔型ASD心房水平分流造成血流动力学的相关变化，但常规经胸二维超声心动图仅能测量平行于声束的血流流速，无法得到实际流速和方向，因此评价腔室结构和流场运动有一定局限性[2]。血流向量成像（vector flow mapping，VFM）可以观测心腔内血流的流场状态，是评估其速度、流量、涡旋数量和能量损耗（energy loss，EL）等心腔内流体运动学改变的无创量化技术[3]。本研究应用VFM评价继发孔型ASD患者在心动周期不同时相下右室内血流流场运动状态和EL的变化规律，揭示其右室流体力学异常及EL的分析应用，旨在为右心功能的定量评估提供有力的参考。

资料与方法

一、研究对象

选取2019年9月至2020年4月我院收治的继发孔型ASD患者97例，按照指南[4]标准分组：无肺动脉高压（pulmonary arterial hypertension，PAH）组30例（肺动脉收缩压≤30 mm Hg，1 mm Hg=0.133 kPa），男16例，女14例，年龄21～74岁，平均（40±13）岁；轻度PAH组25例（30 mm Hg<肺动脉收缩压≤50 mm Hg），男14例，女11例，年龄23～73岁，平均（41±11）岁；中度PAH组22例（50 mm Hg<肺动脉收缩压≤70 mm Hg），男10例，女12例，年龄21～72岁，平均（41±13）岁；重度PAH组20例（肺动脉收缩压>70 mm Hg），男13例，女7例，年龄24～76岁，平均（43±14）岁。纳入标准：①单纯继发孔型ASD；②年龄18~75岁；③病情、透声等条件满足检查需要。排除标准：①透声条件差，或因体位受限等因素不能配合；②合并有卵圆孔未闭、严重的心律失常、原发性PAH、冠状动脉粥样硬化性心脏病、严重瓣膜性病变、原发孔型ASD等；③不愿意参加本研究者。

另选同期健康志愿者29例为正常对照组，其中男18例，女11例，年龄20～72岁，平均（41±12）岁。均排除各种心、肺疾病，无血脂、血糖、血压等指标异常。本研究经我院医学伦理委员会批准，入选者均已签署知情同意书。

二、仪器与方法

采集受试者相关基础数据，记录其年龄、体表面积、体质量、收缩压、舒张压、心率，计算体质量指数。

1. 常规超声心动图及VFM检查：使用日立LISENDO 880彩色多普勒超声诊断仪，S121相控阵单晶体探头，频率1.0～5.0 MHz。受试者取左侧卧位，嘱其平静呼吸，连接同步体表心电图，经胸骨旁短轴、心尖四腔心等切面进行常规扫查，测量右室横径、右房横径、主肺动脉内径、右室前壁厚度、左室射血分数、左室收缩末期和舒张末期偏心指数，以及右心收缩、舒张功能参数，包括Tei指数、三尖瓣环收缩期位移（TAPSE）、右室面积变化率（RVFAC）、三尖瓣E峰和A峰流速及其比值（E/A）、三尖瓣环速度（e、a）、e/a及E/e。然后，启动VFM模式，调节设备深度、增益、彩色多普勒脉冲重复频率等设置，使彩色多普勒脉冲重复频率调至无混叠，帧频≥55帧/s，以清晰显示出右室完整的心内膜，获取优质VFM图像，连续采集3个心动周期图像并储存。

2. 图像分析：首选心尖四腔心切面，将图像通过VFM模式在线进行分析。选择一个心动周期，完整勾画心内膜；然后选择Time-Flow Curve功能，得到时间-流量曲线，将整个心动周期划分为等容舒张期（P0）、舒张早期的快速充盈期（P1）、舒张中期（P2）、心房收缩早期（P3）、心房收缩中期（P4）、心房收缩晚期（P5）、等容收缩期（P6）、收缩中期的快速射血期（P7）、收缩晚期的减慢射血期（P8）9个时相。分别选择Streamline、Energy loss选项，获取P0～P8期右室内的流线和EL影像，测量涡流面积、循环强度、涡旋数量和EL等参数。

3. 重复性检验：由同一操作者于2周后随机抽取25例样本，重复测量P1期的EL大小，分析两次测量的参数在观察者内变异情况；再由另一操作者随机抽取

25例样本，重复测量上述参数，分析观察者间变异情况。

三、统计学处理

应用SPSS 22.0和Med Calc 19.0统计软件。计量资料以$\bar{x}\pm s$表示，多组比较采用单因素方差分析。应用Pearson双变量检验法对右室整体EL与右室收缩、舒张功能参数进行相关性分析。观察者内及观察者间一致性检验采用Bland-Altman法。P<0.05为差异有统计学意义。

结　果

一、各组右室内流线的变化特点

1. 正常对照组和无PAH组：P0期，右室内未发现明显的涡流；P1、P2期（三尖瓣开放之后），发现三尖瓣口附近存在较多涡流；P3~P5期，涡流仍以在三尖瓣口附近为主；P6~P8期（三尖瓣关闭之后），涡流逐渐减退消失。

2. 轻度PAH组整体变化特点与正常对照组、无PAH组相似，但涡流较多，形态不规则，运动方向也较杂乱，见图1。

3. 中度PAH组和重度PAH组：P0期，右室内未发现明显的涡流；P1~P7期，右室内涡流大小、方向、数目均不一样，形态不规则，运动方向杂乱无章，疏密而不均匀；P3~P5期，右室中部附近出现较大的涡流；P8期，涡流逐渐减退消失。重度PAH组较中度PAH组涡流更加杂乱多变，分布呈明显的不规律性。见图2。

二、各组一般资料和右心功能参数比较

各组间年龄、体表面积、体质量指数、收缩压、舒张压、心率比较，差异均无统计学意义。正常对照组、无PAH组、轻度PAH组、中度PAH组和重度PAH组间主肺动脉内径、右室前壁厚度、左室收缩末期偏心指数、左室舒张末期偏心指数均逐渐增大，左室射血分数逐渐减小，差异均有统计学意义（均P<0.05）。轻度、中度、重度PAH组与正常对照组和无PAH组比较，右室横径、右房横径均逐渐增大，差异均有统计学意义（均P<0.05）；无PAH组右室横径、右房横径与正常对照组比较差异均无统计学意义。各组Tei指数、E/e逐渐增大，TAPSE、RVFAC、E、E/A、e、e/a逐渐减小，差异均有统计学意义（均P<0.05）；各组间A、a比较差异

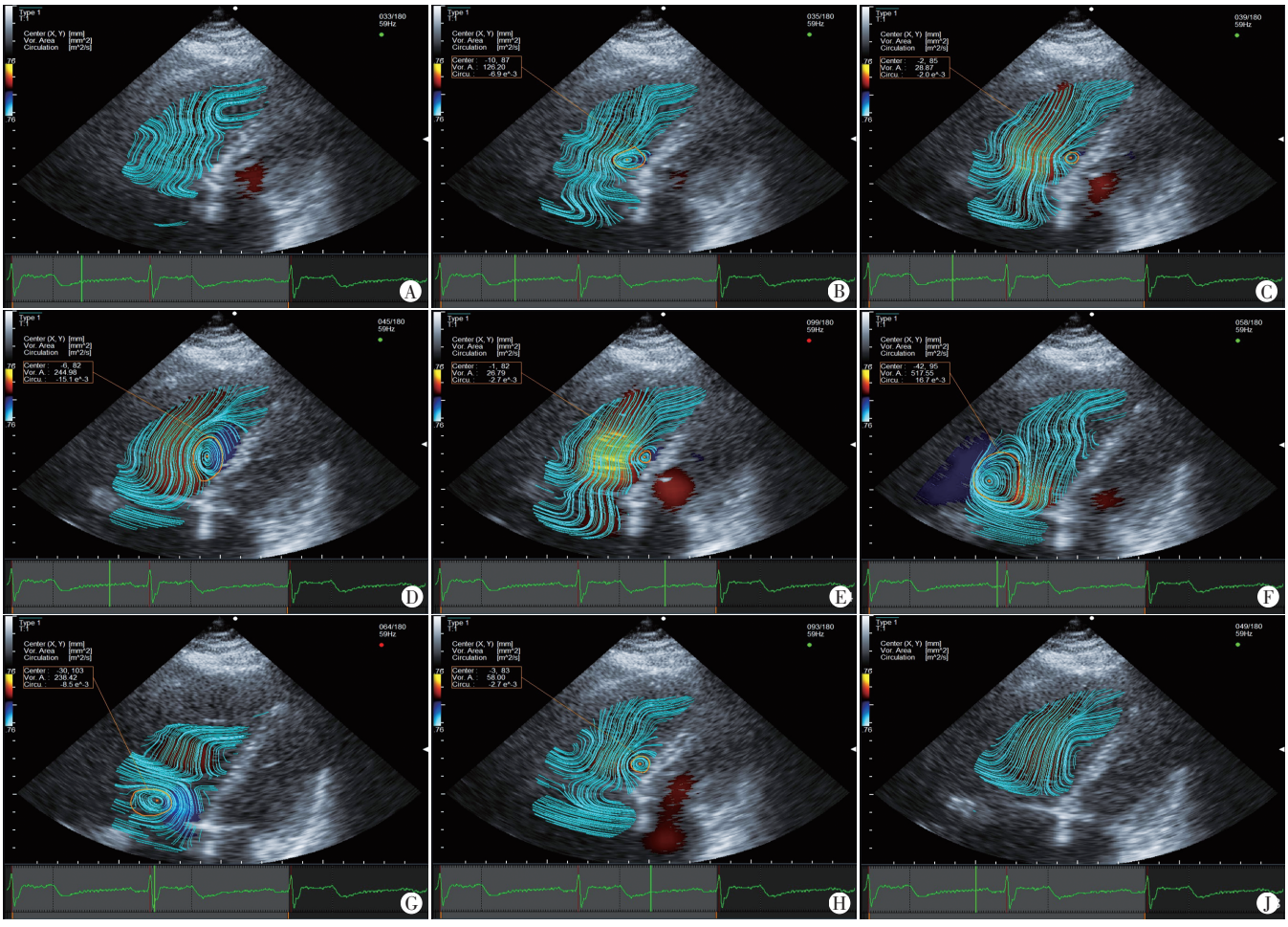


图1　轻度PAH组P0~P8期（A~J）的流线图

均无统计学意义。见表1。

三、各组右室内涡流和EL参数比较

轻度、中度、重度PAH组与正常对照组和无PAH组比较，涡旋面积、循环强度、涡旋数量及EL值在P1~P7期逐渐增加，差异均有统计学意义（均$P<0.05$）。正常对照组与无PAH组P0~P8期的涡旋面积、循环强度、

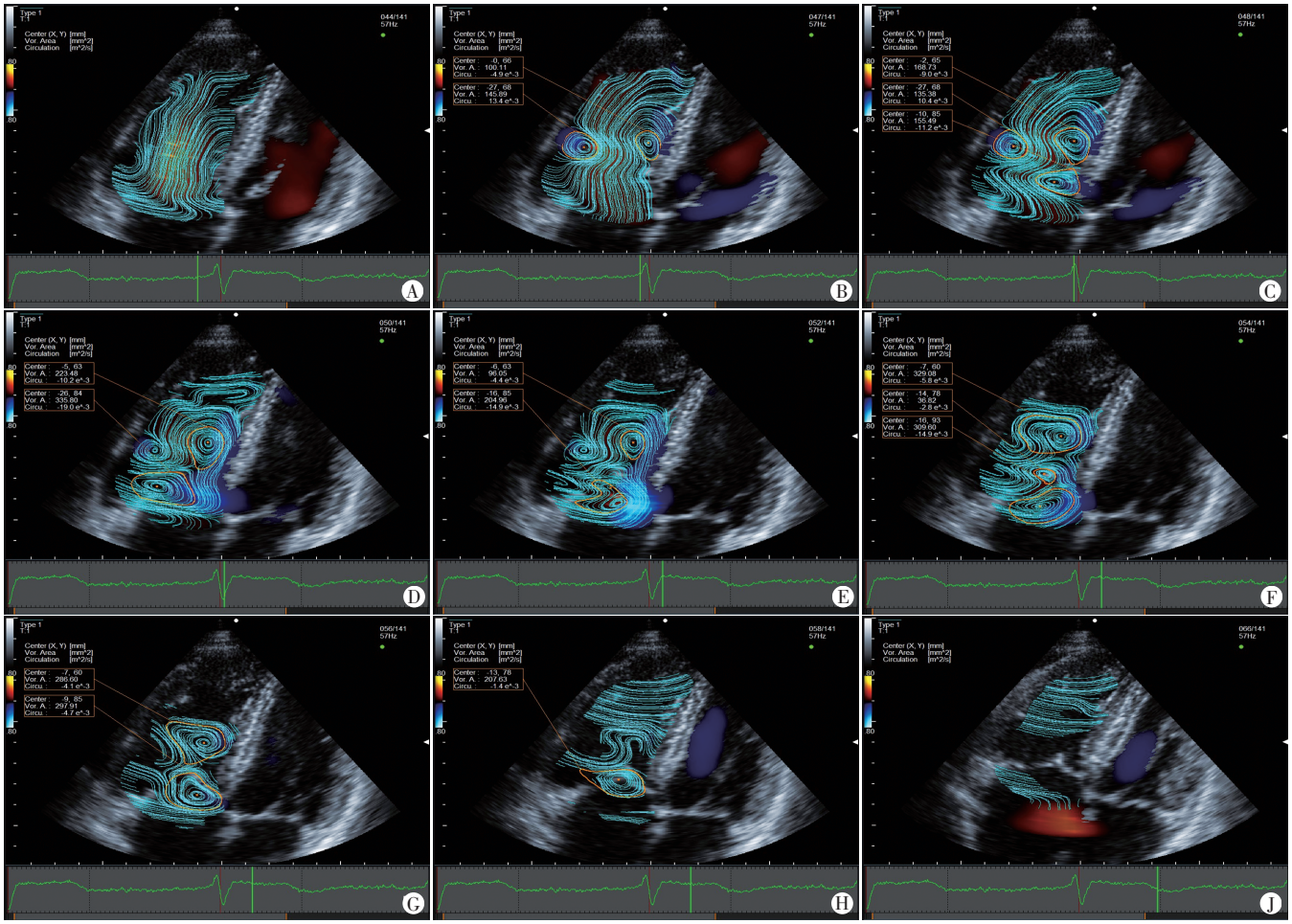


图2　重度PAH组P0~P8期（A~J）的流线图

表1　各组一般资料和右心功能参数比较（$\bar{x}\pm s$）

组别	年龄（岁）	体表面积（m^2）	体质量指数（kg/m^2）	右室横径（cm）	右房横径（cm）	主肺动脉内径（cm）	右室前壁厚度（cm）	收缩压（mm Hg）	舒张压（mm Hg）	心率（次/min）	左室射血分数（%）	左室收缩末期偏心指数
正常对照组（29）	41.00±12.00	1.68±0.30	26.54±2.43	2.41±0.47	4.62±0.22	2.32±0.25	0.36±0.09	127.83±5.42	82.34±5.66	68.24±6.44	60.23±4.19	1.04±0.05
无PAH组（30）	40.00±13.00	1.77±0.63	27.36±3.87	2.45±0.61	4.84±0.25	2.61±0.22	0.44±0.09	124.35±5.19	86.11±5.28	65.30±5.72	53.42±4.11	1.23±0.09
轻度PAH组（25）	41.00±11.00	1.54±0.45	28.31±2.12	2.75±0.43	5.06±0.20	2.99±0.19	0.52±0.09[b]	127.35±6.23	84.22±6.74	63.43±5.41	50.38±3.96	1.37±0.11
中度PAH组（22）	41.00±13.00	1.74±0.26	26.62±3.11	3.18±0.49	5.23±0.27	3.14±0.36	0.62±0.08	125.84±4.44	85.62±6.11	67.99±4.16	46.84±3.49	1.58±0.23
重度PAH组（20）	43.00±14.00	1.63±0.42	28.95±2.48	4.26±0.17	5.71±0.38	3.85±0.46	0.77±0.02	128.01±5.01	85.92±5.34	68.23±6.90	41.55±4.18	1.69±0.34
F值	1.08	1.89	0.69	9.30	16.01	41.61	5.80	0.86	1.58	1.11	34.63	25.87
P值	0.10	0.07	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	1.18	0.54	0.00	0.00

组别	左室舒张末期偏心指数	Tei指数	TAPSE（mm）	RVFAC（%）	E（m/s）	A（m/s）	E/A	e（m/s）	a（m/s）	e/a	E/e
正常对照组（29）	1.02±0.06	0.23±0.09	24.12±4.37	44.96±4.88	0.57±0.08	0.39±0.07	1.46±1.22	0.13±0.06	0.09±0.02	1.46±0.12	4.28±0.32
无PAH组（30）	1.15±0.10	0.34±0.08	20.56±4.72	42.18±4.10	0.52±0.14	0.48±0.27	1.09±0.15	0.11±0.08	0.10±0.02	1.15±0.20	4.75±0.74
轻度PAH组（25）	1.30±0.09	0.47±0.33	16.17±4.07	38.29±5.37	0.48±0.20	0.56±0.38	0.86±0.36	0.07±0.02	0.08±0.05	0.83±0.34	7.25±0.63
中度PAH组（22）	1.46±0.12	0.61±0.58	14.82±3.74	31.55±6.08	0.44±0.27	0.59±0.42	0.75±0.19	0.05±0.04	0.16±0.10	0.32±0.29	8.54±0.67
重度PAH组（20）	1.57±0.12	0.73±0.40	12.30±3.12	28.16±6.69	0.40±0.10	0.65±0.38	0.62±0.13	0.04±0.02	0.15±0.07	0.27±0.24	8.90±0.57
F值	32.11	18.84	40.68	12.03	28.44	0.26	42.44	26.55	0.10	17.37	30.08
P值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00

TAPSE：三尖瓣环收缩期位移；RVFAC：右室面积变化率；E：三尖瓣E峰流速；A：三尖瓣A峰流速；e、a：三尖瓣环速度。1 mm Hg=0.133 kPa

涡旋数量及EL值比较，差异均无统计学意义。整体EL峰值均出现在P1期。见表2。

四、右室整体EL与右心收缩、舒张功能参数的相关性分析

126例受试者右室整体EL在P1期分别与Tei指数、三尖瓣E峰流速、E/e均呈正相关（r=0.768、0.941、0.937，均P<0.05），与TAPSE、RVFAC、e均呈负相关（r=−0.864、−0.734、−0.817，均P<0.05）。见图3。

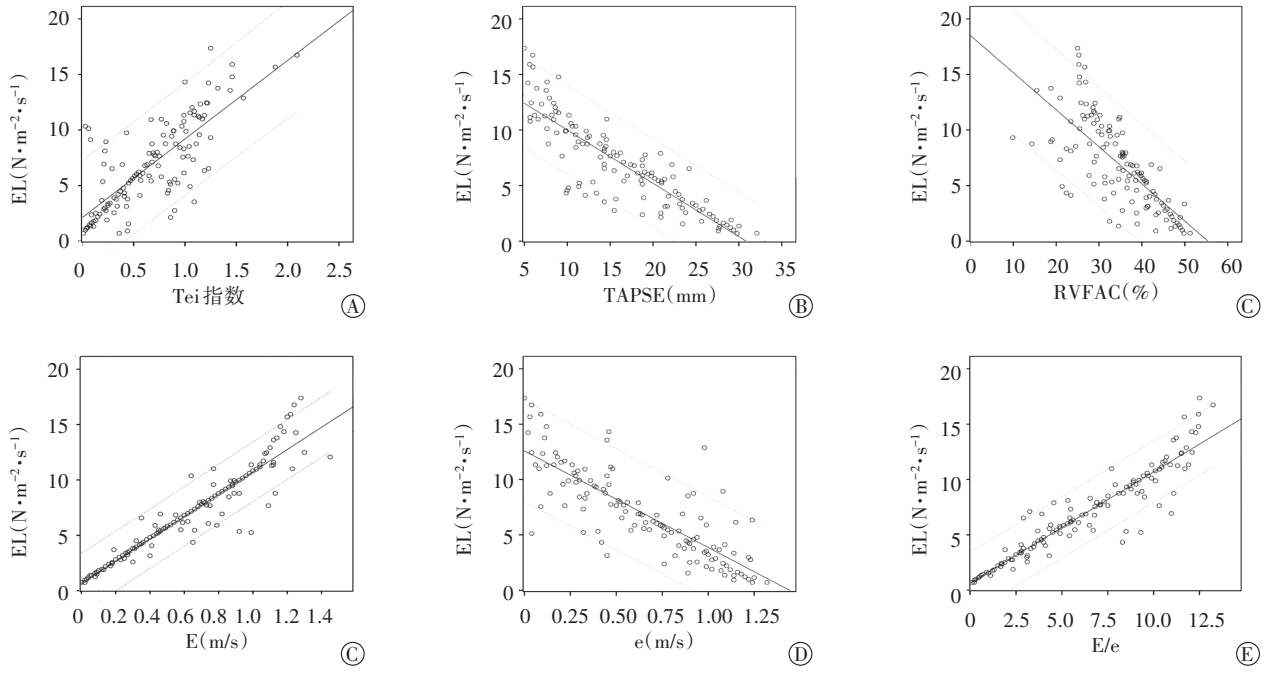
五、重复性检验

P1期EL在观察者内和观察者间均有良好的一致性，所有测值落在差值的95%可信区间内（P<0.05）。见图4。

表2 各组不同时相右室涡流和EL参数比较（$\bar{x}\pm s$）

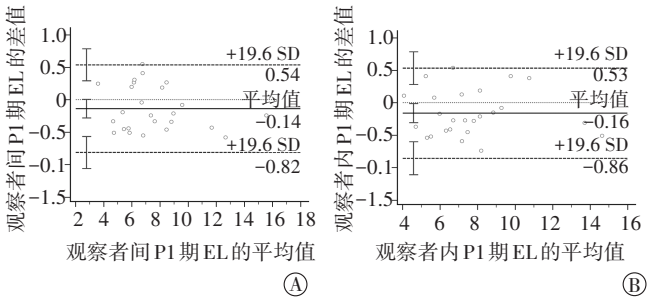
组别	涡旋面积（mm^2）								
	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
正常对照组	7.54±10.10	301.57±51.25	218.23±56.43	254.53±92.17	277.35±91.70	259.83±71.63	377.21±249.01	372.80±354.32	25.02±37.69
无PAH组	7.88±10.47	307.62±48.95	223.96±59.39	268.21±96.32	286.93±90.19	266.47±74.39	379.60±251.39	364.57±323.19	27.31±36.90
轻度PAH组	9.69±9.60	336.46±63.09	260.48±52.21	273.41±68.44	299.33±84.87	278.28±75.63	385.49±262.68	355.28±314.11	32.11±28.69
中度PAH组	12.23±12.34	408.31±59.74	343.91±42.38	328.76±83.43	345.60±81.90	328.83±84.42	407.94±237.43	365.93±290.39	47.38±28.26
重度PAH组	13.85±14.62	420.63±62.18	359.85±48.60	346.31±76.53	360.43±75.82	341.63±86.38	419.25±256.31	364.24±281.12	52.10±28.49
F值	85.46	28.73	80.52	58.62	42.32	19.28	34.66	1.72	25.44
P值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	0.00
组别	循环强度（m^2/s）								
	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
正常对照组	2.18±1.14	29.17±7.22	20.46±8.83	26.14±55.55	14.48±7.81	20.91±4.38	24.81±4.91	15.47±12.11	3.36±2.59
无PAH组	2.12±1.50	29.89±8.69	21.55±8.44	27.08±54.18	16.26±7.11	21.54±4.91	24.52±3.88	15.31±12.69	3.65±2.11
轻度PAH组	2.42±1.34	32.61±8.55	25.12±6.71	28.54±61.37	18.61±6.38	24.32±6.39	26.18±5.47	19.73±8.47	3.89±3.25
中度PAH组	6.87±3.62	48.29±13.48	31.49±9.67	45.62±47.48	26.82±6.22	30.70±8.42	35.94±6.25	27.41±9.39	4.61±2.28
重度PAH组	6.15±3.22	57.31±15.37	39.24±10.11	55.39±44.36	31.25±7.47	36.28±8.12	39.26±7.46	34.66±9.14	5.02±3.37
F值	1.85	23.11	10.89	42.16	52.46	55.41	18.63	1.89	26.67
P值	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00
组别	涡旋数量（个）								
	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
正常对照组	0.58±0.13	4.01±0.50	3.79±0.70	2.07±0.78	2.58±0.64	1.64±0.69	1.68±0.69	1.38±0.63	0.56±0.59
无PAH组	0.56±0.25	4.24±0.68	3.83±0.13	2.11±0.69	2.59±0.48	1.69±0.23	1.70±0.13	1.42±0.51	0.63±0.42
轻度PAH组	0.49±0.96	4.61±0.89	4.03±0.63	2.20±0.75	2.73±0.55	1.85±0.73	1.73±0.91	1.67±0.75	0.87±0.11
中度PAH组	0.53±0.47	6.42±1.48	5.16±0.83	3.28±1.15	3.46±0.68	2.04±0.32	2.82±1.10	2.14±0.69	1.47±0.84
重度PAH组	0.51±0.68	7.38±1.72	6.49±1.15	3.91±1.94	4.22±0.73	2.74±0.65	3.19±1.32	2.75±0.51	1.83±0.56
F值	1.10	76.29	42.69	31.32	16.59	43.25	20.19	4.90	15.33
P值	0.39	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
组别	EL（$N\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$）								
	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
正常对照组	1.58±0.44	8.73±0.72	5.09±0.66	3.72±0.79	3.22±0.64	1.61±0.39	1.44±0.86	1.36±0.63	0.71±0.90
无PAH组	1.59±0.38	9.68±0.66	5.11±0.48	4.41±0.87	3.65±0.88	1.89±0.67	1.65±0.58	1.48±0.68	0.82±0.38
轻度PAH组	4.64±0.59	13.25±0.38	8.93±0.38	6.21±0.91	4.52±0.82	3.90±0.11	3.22±0.62	2.14±0.75	1.15±0.54
中度PAH组	7.21±0.89	16.72±0.88	12.24±0.59	8.22±0.35	6.21±0.46	5.54±0.37	4.18±0.38	2.75±0.75	2.23±0.85
重度PAH组	8.52±0.11	17.36±0.66	14.82±0.27	9.03±0.37	7.11±0.54	5.98±0.91	5.62±0.12	3.33±0.41	2.89±0.21
F值	51.67	48.20	3.34	43.19	47.00	1.29	2.01	4.21	0.31
P值	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.10	0.01	0.00

EL：能量损耗



A~F：分别为EL与Tei指数、TAPSE、RVFAC、E、e及E/e的相关性分析散点图

图3　126例受试者P1期右室整体EL与右心收缩、舒张功能参数的相关性分析散点图



A：观察者间；B：观察者内。上下两条水平虚线表示95%一致性可信区间，中间实线表示EL差值的平均值，越多的点落在两条虚线之间表明一致性越好

图4　观察者间和观察者内P1期EL重复检验Bland-Altman图

讨　论

VFM以超声彩色血流多普勒成像和二维心肌组织追踪技术为基础，遵守血液不可压缩、质量守恒定律及连续方程的原理，通过联合心腔血流评估来测量血流流速、流量及涡量的时间-空间分布情况[5]。已有学者[6]证实VFM测得的血流速度向量值与腔室内实际血流速度大小相似，说明VFM是一种可在临床应用中有效评估心腔血流运动变化的成像技术。本研究应用VFM评估继发孔型ASD患者在心动周期不同时相下右室腔内血流流场运动及EL的演变规律，旨在为发现心腔血流动力学改变提供一种全新的方法。

Honda等[7]研究发现室间隔缺损儿童的左室整体EL与导管内参数（右室收缩压和舒张末压）和血清脑钠肽水平具有相关性。本研究结果发现，正常对照组、无PAH组、轻度PAH组流线成像均显示P1、P2期三尖瓣口附近存在较多涡流，P6~P8期涡流逐渐减退消失。分析原因可能是当ASD不合并PAH或合并PAH较轻时，右室收缩压和舒张末压无明显升高，对腔室形态和结构变化影响较小，未对血流流场运动造成明显影响[8]。中度PAH组和重度PAH组在P1~P7期右室内均有大小、方向、数目不一样的涡流出现，且重度PAH组较中度PAH组涡流更加杂乱多变，分布呈明显的不规律性，同时定量分析结果发现轻度、中度、重度PAH组与正常对照组和无PAH组比较，涡旋面积、循环强度、涡旋数量及EL值在P1~P7期均逐渐增加（均$P<0.05$），正常对照组P0~P8期上述参数与无PAH组比较差异均无统计学意义。随着PAH压力逐渐升高，涡流逐渐增多增强，EL值逐渐增大，有研究[9]证实，ASD心房水平左向右分流会导致肺血流量增多，使肺血管的血流剪切力增大，引起肺血管损伤，故ASD与是否发生PAH存在相关性，缺损越大，分流量越大，PAH的患病率就越高。此外，研究[10]发现PAH与ASD的缺损大小也具有相关性。ASD心房水平左向右分流可增加右室舒张末期容积，导致右心容量负荷增加，引起肺血容量增加和肺动脉扩张，PAH压力逐渐升高，同时左心容量负荷降低，室间隔偏向左室一侧，使血液淤滞、血容量及血液质点增多，导致涡流和EL逐渐增加[11]。

本研究相关性分析发现，126例受试者右室整体

EL在P1期分别与Tei指数、E、E/e均呈正相关(r=0.768、0.941、0.937，均P<0.05)，与TAPSE、RVFAC、e均呈负相关(r=−0.864、−0.734、−0.817，均P<0.05)。通过分析发现，涡流在心腔内旋转碰撞，会影响正常血流向量的分布，同时由于血流黏滞，心室壁各节段的室壁剪切应变力与周围血流相互摩擦会产生热量，增加流体质点的EL[12]。Tei指数是评价右心功能的有效参数，且很少受到腔室形态、三尖瓣反流及右室充盈状态的干扰[13]。ASD合并PAH时，肺血管受到的阻力变大，右心后负荷变重，同时由于右心压力变大和右室射血量的减少，致PAH逐渐升高，EL逐渐增加，引起右心收缩和舒张功能降低，最终致心功能衰竭[14]。对右室EL进行分析可以为定量评估右心收缩和舒张功能提供有力的依据。

本研究的局限性：首先，样本量较少，今后需进一步增加样本量，得到更加准确的实验结果；其次，VFM应用二维图像来模拟三维的血流流场[15]，可能会丢失一些重要数据。后续将通过评估ASD封堵术前、术中及术后患者的情况，结合右心导管检测结果，进一步为临床治疗提供更加可靠的参考依据。

综上所述，VFM可反映ASD右室血流流场运动和EL的变化规律，通过可视化测量涡旋面积、循环强度、涡旋数量及EL等参数，为右室EL的应用分析及右心收缩、舒张功能、PAH压力大小的定量评估提供有力参考，为ASD手术治疗提供更多的参考价值。

参考文献

[1] Peacock AJ, Crawley S, McLure L, et al. Changes in right ventricular function measured by cardiac magnetic resonance imaging in patients receiving pulmonary arterial hypertension-targeted therapy: the EURO-MR study[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2014(7): 107-114.

[2] 陈倬，李治安. 血流向量成像：一种新的心血管内流场结构可视化研究方法[J]. 中华超声影像学杂志，2010，19(5)：451-453.

[3] Kazuaki W, Junki Y, Keisuke M, et al. Elevated left ventricular end-diastolic pressure deteriorates intra-left ventricular pressure gradient during atrial contraction[J]. Circulation, 2018, 138(1): 12474.

[4] Galie N, Humbert M, Vachiery JL, et al. 2015 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension: the joint task force for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Respiratory Society (ERS) Endorsed by: Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPC), International Society for Heart and Lung Transplantation (ISHLT)[J]. Eur Respir J, 2015, 46(7): 903-975.

[5] Yuko S, Nobuyuki K, Masataka S, et al. The association of left ventricular relative pressure gradient by vector flow mapping with global longitudinal strain rate[J]. J Am Soc Echocardiography, 2018, 31(6): 106.

[6] Uejima T, Koike A, Sawada H. A new echocardiographic method for identifying vortex flow in the left ventricle: numerical validation[J]. Ultrasound Med Biol, 2010, 36(5): 772-788.

[7] Honda T, Itatani K, Takanashi M, et al. Exploring energy loss by vector flow mapping in children with ventricular septal defect: pathophysiologic significance[J]. Int J Cardiol 2017, 244(10): 143-150.

[8] Kikuchi S, Muto K, Yamamoto J, et al. Clinical importance of the magnitude of left ventricular suction in heart failure: quantitative evaluation by vector flow mapping[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2019, 20(Suppl 1): 263.

[9] 程志明，李冬梅，李杨. 房间隔缺损肺动脉高压发病机制与性质评估[J]. 临床军医杂志，2018，46(3)：366-368，372.

[10] Providencia R, Botelho A, Quintal N, et al. Pulmonary hypertension in patients with ostium secundum atrial septal defect——is it related to echocardiographic complexity?[J]. Rev Port Cardiol, 2009, 28(10): 1087-1096.

[11] 吴文谦，刘金凤，刘曼薇，等. 改良的血流向量成像技术评价房间隔缺损患者舒张期心室血流流场特征[J]. 临床超声医学杂志，2017，19(3)：150-154.

[12] Chen Z, Li Y, Li C, et al. Right ventricular dissipative energy loss detected by vector flow mapping in children: characteristics of normal values[J]. J Ultrasound Med, 2019, 38(1): 131-140.

[13] Fischer L, Benjamin N, Blank N, et al. Right heart size and function significantly correlate in patients with pulmonary arterial hypertension a cross-sectional study[J]. Respir Res, 2018, 19(1): 216-238.

[14] 董文娟，贾恩亮. 超声心动图对肺动脉高压患者右心室结构及功能的诊断价值[J]. 中国基层医药，2019，26(15)：1892-1894.

[15] Asami R, Tanaka T, Shimizu M, et al. Ultrasonic vascular vector flow mapping for 2-D flow estimation[J]. Ultrasound Med Biol, 2019, 45(7): 1663-1674.

（收稿日期：2020-05-06）