

二尖瓣狭窄及人工瓣膜置换左室流场的超声向量血流图

李建华, 王庆慧, 丁云川, 尹帆, 陈剑, 张瑜
(昆明医科大学附属延安医院, 云南昆明 650051)

[摘要] **目的** 应用超声向量血流图技术(VFM)对比风湿性心脏病二尖瓣狭窄、人工机械二尖瓣置换及人工生物二尖瓣置换后的左室流场变化规律,为临床评估手术指征、判断预后提供更客观、更丰富的参考依据。**方法** 选取50例健康志愿者为对照组,43例临床诊断风湿性心脏病二尖瓣重度狭窄为病例组0,临床诊断风湿性心脏病二尖瓣重度狭窄人工机械瓣术后32例,人工生物瓣膜术后的患者26例,分别为病例组1、病例组2,记录3个心动周期,经过DSA-RS1脱机软件处理并进行漩涡描述参数测量。**结果** 疾病组0、病例组1、病例组2观察结果均显示舒张期仅在舒张早期二尖瓣叶下方出现2个高速密集且对称旋转的小漩涡,这一现象与对照组相似,但是形态更加显著,漩涡中心位置更远离二尖瓣环连线水平,速度更快;二尖瓣人工机械瓣置换术后左心室内流场变化为舒张早期最大向量速度仍然大于对照组($P < 0.05$);二尖瓣人工生物瓣置换术后左心室内流场变化为舒张早期最大向量速度与对照组差异无统计学意义($P > 0.05$),但二尖瓣人工机械瓣置换及生物瓣置换术后左心室内血流主流方向均为室间隔转向至左室后壁、侧壁再汇入左室流出道,与正常对照组不同。**结论** VFM图像能显示心室内血液流场的变化,能初步定量心腔内复杂流场结构,同时也可以为二尖瓣狭窄的评估、置换瓣膜选择及术后人工瓣膜功能评估提供更详尽的信息。

[关键词] 超声心动图;向量血流图;二尖瓣狭窄;人工瓣膜;左室流场

[中图分类号] R445.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2095-610X(2015)10-0022-06

Left Ventricular Flow in Patients with Mitral Valve Stenosis and Bileaflet Prosthesis Mitral Valve by Vector Flow Mapping Using Doppler Echocardiography

LI Jian-hua, WANG Qing-hui, DING Yun-chuan, YIN Fan, CHEN Jian, ZHANG Yu

(Dept. of Ultrasonography, Affiliated Yan'an Hospital of Kunming Medical University, Kunming Yunnan 650051, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the dynamic changes of left ventricle (LV) vortices in the patients with rheumatic heart disease mitral stenosis and after mitral valve replacement in mechanical valve or bioprosthetic valve prosthesis, in order to provide richer and more objective prognosis for the clinical evaluation of surgical indications, postoperative effectevaluation and follow-up judgments. **Methods** We selected 50 cases of healthy volunteers as a control group, 43 patients with rheumatic mitralv stenosis (case 0), 32 patients with mechanical mitral valve prosthesis (case 1) and 26 patients with bioprosthetic valve prosthesis (case 2), and assessed the parameters by Aloka Prosound $\alpha 10$. Images for flow visualization were acquired on VFM recorded of three heartbeat cycle, adjusting image width, depth, and spatial-temporal settings to obtain the highest possible frame rate while vector flow-mapping data, including parameters defining location, duration, rotation direction, intensity, and size of the detected vortices were measured after with DAS-RS1 software analyzed offline. **Results** The observation results of each case group showed that only in the early diastolic phase two high-intensive and

[基金项目] 云南省卫生厅内设研究机构基金资助项目(2014C094)

[作者简介] 李建华(1981~),女,河北邯郸市人,医学硕士,主治医师,主要从事心血管超声诊断工作。

[通讯作者] 王庆慧. E-mail: wqh962099@163.com

symmetrical rotation of the small vortex components appeared below the mitral valve near the apical side during the left ventricular diastolic. Compared with normal group, this phenomenon in case1 was more obvious, and vortex center position was further far away from the mitral annulus line level, had faster flow velocity vector in all the above cases. The changes of left ventricular diastolic flow field indicated the maximum speed was still higher in early diastolic phase than that of control group ($P < 0.05$). Nevertheless, there was few significant difference between case 2 and control group ($P > 0.05$). Different with control group, the mainstream direction of blood flow of left ventricle turned from ventricular septal to posterior wall and lateral wall, then to the left ventricular outflow tract in case1 and case2. **Conclusion** VFM images can reflect the changes of left ventricular flow field through quantifying LV vorticity parameters. VFM technology does help to evaluate hemodynamics of the normal and abnormal left ventricular flow field, thus provide more detailed information for assessment of preoperative valvular stenosis and postoperative prosthesis function and prosthesis selection.

[**Keywords**] Echocardiography; Vector flow mapping; Mitral stenosis; Mitral valve replacement; Left ventricular flow field

向量血流图 (vector flow mapping, VFM) 技术是一种评价血流动力学的新技术, 以记录动态彩色多普勒血流图为基础, 可检测心腔内任意部位、任意时刻血流速度的向量, 分别以向量图和流线图的方式显示血流分布特点^[1]。二尖瓣狭窄为一种常见的心脏瓣膜病, 绝大多数是由风湿热引起, 二尖瓣置换术是外科治疗严重二尖瓣疾病的一种常用方法。彩色多普勒超声心动图是目前临床上评价人工瓣膜功能的最常用方法。通过传统的超声心动图测量及血流显示方法, 尚不能较全面地观察心腔内流场的复杂变化。随着物理学和科技的发展, 使人们能够显示和观察漩涡运动^[2]。本研究应用 VFM 技术, 通过血流速度向量和流线显示心室内血液流场变化, 观察和分析正常人与二尖瓣狭窄患者、二叶式人工机械瓣置换及人工生物瓣置换的心室内血流模式与正常人血流模式的区别。

1 资料与方法

1.1 研究对象

选取 50 例健康志愿者为对照组, 无心血管病史, 血常规检查无血脂、血糖等生化指标异常; 选取 43 例临床诊断风湿性心脏病二尖瓣重度狭窄为病例组 0, 血常规检查无血脂、血糖等生化指标异常; 临床诊断风湿性心脏病二尖瓣重度狭窄人工机械瓣术后 32 例, 人工生物瓣膜术后的患者 26 例, 分别为病例组 1、病例组 2, 血常规检查无血脂、血糖等生化指标异常。

入选标准和排除标准: (1) 对照组: 常规体检无心血管疾病, 血液检查无血脂、血糖等生化指标异常的正常成人, 年龄 20 ~ 60 岁, 血压

<140 / 90 mmHg (1 mmHg = 0.133 kPa), 心率 60 ~ 100 次 / min; (2) 病例组 0、1、2: 临床诊断为风湿性心脏病二尖瓣狭窄需要置换人工瓣膜, 经超声心动图检查二尖瓣反流面积 < 4.00 cm², 无主动脉瓣反流的患者, 年龄 20 ~ 60 岁, 血压 < 140 / 90 mmHg, 心率 60 ~ 100 次 / min。人工瓣膜分别为二叶式机械瓣、异种生物瓣膜。手术方式为不保留二尖瓣瓣下结构。

1.2 仪器与方法

应用 Aloka Prosound α 10 彩色多普勒超声诊断仪, UST 52105 心脏探头, 频率 1.88 ~ 4.02 MHz。

1.2.1 彩色多普勒超声检查 受检者取左侧卧位, 行常规超声心动图检查, 选取心尖四腔观及五腔观的彩色多普勒图像, 二维增益 45% ~ 65%, 彩色增益 50% ~ 65%, 帧频 (30 $\pm$ 5) 帧 / s, 记录 3 个心动周期, 测量计算平均值。

1.2.2 VFM 检查 经过 DSA-RSI 脱机软件处理彩色多普勒图像, 得到心腔内血流速度向量和流线, 即 VFM 图像。

1.2.3 漩涡描述参数的测量 (1) 心动周期的确定。根据时间—血流曲线 (Time-flow curve), 横坐标为时间, 对应于同步的心电图, 纵坐标为 VFM 流量, 结合与其同步的心电图 (以心电图 R 波顶点到 T 波结束为收缩期), 将该曲线可分解为 6 个心动周期, 再据此分期切换到不同显示模式, 测量相关指标; (2) 漩涡描述参数的获得。为清晰显示流场内变化, 漩涡图选取 VFM 等流量线值为 3 cm²/s, 漩涡精细度值 (T) = 1; 局部线速度分布图取 VFM 等流量线值为 60 cm/s, (T) = 1, 疏密度值 (D) = 3。漩涡描述参数分别为: 漩涡横径 (D_x)、漩涡纵径 (D_y)、漩涡横向位置 (P_x)、漩涡纵向位置 (P_y)、漩涡最大向量速度 (V_{max})、漩涡

圈数 (N) 及漩涡旋转方向。

1.3 统计学分析

采用 SPSS 统计软件, 计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示。病例组与对照组漩涡描述参数在各心动周期期间的比较采用重复测量方差分析。病例组 0、1、2 组、正常对照组各参数比较采用单因素方差分析, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 常规超声检查数据结果

常规超声检查结果显示, 疾病组与对照组年龄、左室舒张末期横径和左室收缩功能 (EF 值, 双平面 Simpson's 法测量) 比较差异无统计学意义, $P > 0.05$ 。疾病组与对照组二尖瓣瓣口面积 (PHT 法估测) 和二尖瓣瓣下 1 cm 处血流速度 (PW 测量) 比较差异有统计学意义, $P < 0.05$ (见表 1)。

2.2 正常对照组健康成年人左心室内的漩涡演变规律

正常对照组左心室流场观察结果显示: 等容舒张 (isovolumetric relaxation phase, IVR) 未检测到明显的漩涡。舒张早期 (early diastole phase, ED) 和晚期 (late diastole phase, LD), 通过二尖瓣口的血流形成 2 个二尖瓣下的小漩涡, 对称高速旋转; 而舒张中期 (mid-diastole phase, MD) 和等容收缩期 (isovolumetric contraction phase, IVC) 左室内回旋血流形成 1 个大漩涡, 逆时针低速旋转。小漩涡为通过二尖瓣进入左室的血流激发出的 1 对双胞漩涡, 位于主流的两侧, 二尖瓣前后叶附近, 大漩涡为主流进入左室后碰到室壁而折返回旋所形成的漩涡, 二者为不同血流状态所形成的两类涡环, 交替出现, 具有规律性。

2.3 风湿性心脏病二尖瓣狭窄左心室内漩涡演变与正常对照组比较

病例组 0 观察结果显示舒张期仅在舒张早期

二尖瓣叶下方近心尖侧出现 2 个高速密集且对称旋转的小漩涡 (图 1), 这一现象与对照组相似, 但是形态更加显著, 漩涡中心位置更远离二尖瓣环连线水平, 速度更快, $P < 0.05$; 舒张中晚期没有交替出现大漩涡和小漩涡, 而是表现为舒张中期的的大漩涡直接延续至等容收缩期的的大漩涡, 均为逆时针旋转的高速度较密集且多中心的大涡环, 与对照组舒张中期、等容收缩期的的大漩涡相比, 也是形态更扁长, 位置更靠近左室中心, 速度更快, $P < 0.05$ 。

Dy / Dx 比值、Py / Px 比值及漩涡最大向量速度 (Vmax) 与狭窄程度显著相关。狭窄程度越重则漩涡形态越大越扁长, 漩涡中心位置远离二尖瓣环水平越靠近左心室中心, 漩涡最大向量速度越快, $P < 0.01$ 。涡流最大向量速度与漩涡圈数显著相关, 舒张早期、舒张中晚期及等容收缩期的相关系数分别为 $R = 0.673$ 、 0.669 、 0.732 。 $P < 0.01$ 。疾病组 0 为左心室内血流主流漩涡旋转方向为沿左室后壁、侧壁转向至室间隔直接汇入左室流出道 (图 2), 与正常对照组相同。

2.4 风湿性心脏病二尖瓣狭窄人工机械瓣置换术后左心室内漩涡演变

病例组 1 二尖瓣人工机械瓣置换术后左心室内流场变化为舒张早期近二尖瓣环处出现的小漩涡, 与对照组相同, 舒张中晚期为顺时针旋转速度较密集的大涡环 (图 3), 漩涡大小、位置、最大向量速度虽接近对照组, 但与对照组舒张中期再次出现小漩涡的规律完全不同, 且最大向量速度仍然大于对照组 ($P < 0.05$), 见表 2。等容收缩期左室内为一个低速稀松且顺时针旋转的大漩涡, 与对照组无区别, 但左心室内血流主流方向为室间隔转向至左室后壁、侧壁再汇入左室流出道 (图 4) 与对照组完全不同。

2.5 风湿性心脏病二尖瓣狭窄人工生物瓣置换术后左心室内漩涡演变

病例组 2 二尖瓣人工生物瓣置换术后左心室

表 1 各组超声常规数值比较 ($\bar{x} \pm s$)

Tab. 1 The comparison of conventional ultrasound measured values between different groups ($\bar{x} \pm s$)

组别	年龄 (岁)	MVOA (cm ²)	LVEDd (mm)	LVEF (%)	Vmv (cm/s)
对照组	35.62 ± 16.33	5.19 ± 2.31	46.61 ± 8.35	63.54 ± 5.41	90.34 ± 35.10
病例组 0	36.84 ± 14.39	1.56 ± 0.67*	42.46 ± 5.39	61.35 ± 4.16	223.18 ± 45.66*
病例组 1	36.78 ± 13.88	2.89 ± 1.05*	44.15 ± 6.32	60.26 ± 3.67	170.32 ± 38.17*
病例组 2	40.25 ± 11.34	4.57 ± 1.94	45.33 ± 6.68	59.42 ± 3.26	100.33 ± 36.77

注: MVOA: 二尖瓣口面积, LVEDd: 左室舒张末径, LVEF: 左室收缩功能, Vmv: 二尖瓣口流速; 与对照组比较, * $P < 0.05$ 。

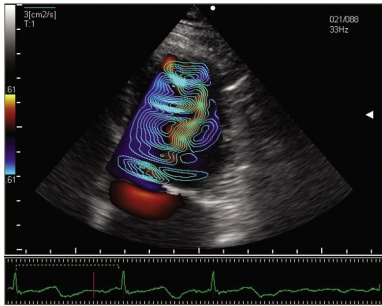


图 1 二尖瓣狭窄时左心室舒张早期涡流图

Fig. 1 Early diastolic left ventricle vortex graphy of MS group

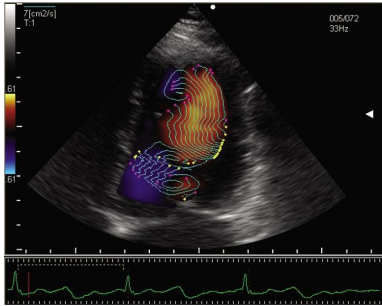


图 2 二尖瓣狭窄时左心室血流旋转方向图

Fig. 2 Left ventricle blood flow rotation direction of MS group

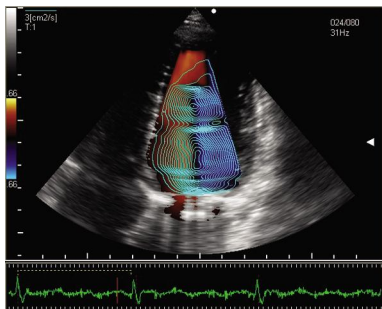


图 3 人工机械二尖瓣舒张期左心室涡流图

Fig. 3 Early diastolic left ventricle vortex graphy of mechanical valve prosthesis group

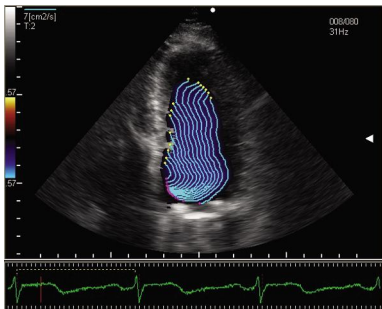


图 4 人工机械二尖瓣左心室内血流旋转方向图

Fig. 4 Left ventricle blood flow rotation direction of mechanical valve prosthesis group

内流场变化为舒张早期近二尖瓣环处出现 2 个相对靠近二尖瓣瓣环高速密集且对称旋转的小漩涡, 与对照组基本相同, 舒张中晚期为顺时针旋转速度较密集且多中心的大涡环 (图 5), 漩涡大小、位置、最大向量速度虽接近对照组, 最大向量速度与对照组无明显差异 ($P>0.05$), 见表 2, 但仍无对照组舒张中期再次出现小漩涡。等容收缩期左室内为一个低速稀松且顺时针旋转的大漩涡, 与对照组无区别, 但左心室内血流主流方向仍为室间隔转向至左室后壁、侧壁再汇入左室流出道 (图 6)。

3 讨论

德国力学家、近代力学的奠基人之一普朗特

(Prandtl L) 提出了边界层的概念, 建立了绕物体流动的小粘性边界层方程, 奠定了现代流体力学的基础^[3]。根据边界层理论, 通过二尖瓣进入左室内的层流, 在遇到二尖瓣的瓣缘时, 就产生了漩涡。位于二尖瓣下的漩涡作用于二尖瓣叶使之关闭, 从而形成较大的流出道; 另一方面, 其与随后的主流回旋相融合, 一同将血流转向左室流出道方向旋转, 这种漩涡的形式保持了血流的动能, 同时改变血流的方向朝向流出道, 以便在收缩期时以最小的耗散来传送动能^[4-5]。本研究表明, 正常成人左室内的血流流场结构存在规律性漩涡运动, 可以分为 2 种模式: 一种是在舒张早期和晚期的双胞小漩涡, 另一种是在舒张中期和等容收缩期, 由心室内血流的主流碰到室壁后改变方向而形成的较大漩

表 2 各组漩涡参数比较
Tab. 2 Comparison of vortex parameters were between different groups

组别	Dy/Dx			Py/Px			Vmax(cm/s)		
	ED	MD-LD	IVC	ED	MD-LD	IVC	ED	MD-LD	IVC
对照组	0.86	0.93	0.84	1.92	5.26	4.33	69.59	36.25	18.36
病例组 0	1.25*	1.30	1.18	16.22*	18.13	20.74	100.34*	69.56*	48.87*
病例组 1	1.05* ^Δ	1.13	1.09	6.39* ^Δ	10.62	11.44	90.35* ^Δ	53.61* ^Δ	36.22* ^Δ
病例组 2	0.89 ^Δ	0.97	0.90	2.53 ^Δ	6.21	5.03	75.11 ^Δ	40.37 ^Δ	25.43 ^Δ

注: Vmax: 最大向量速度, 与对照组比较, * $P<0.01$, 组间比较, ^Δ $P<0.01$ 。

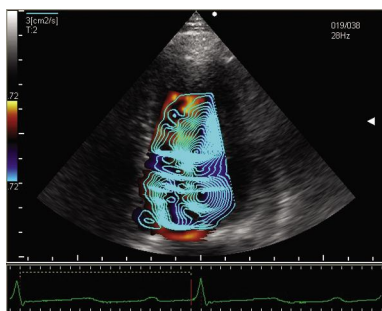


图 5 人工生物二尖瓣舒张期左心室涡流图

Fig. 5 Early diastolic left ventricle vortex graphy of bioprosthesis valve prosthesis group

涡,这与国内外相关研究的观察结果相似。在本研究的对照组中也观察到了这个现象:不对称结构的二尖瓣前叶参与分割流入和流出道,对避免血流的碰撞、耗散能量有重要作用;而在病例组,双叶的机械瓣是对称结构的,却不能如天然二尖瓣那样引导血流旋转,呈现出与对照组旋转方向完全相反的漩涡^[5-8]。

3.1 二尖瓣狭窄组 (病例组 0)

从空间角度上看,二尖瓣狭窄时,随着狭窄程度的加重,左心室内的漩涡形态是逐步增大的,漩涡最大向量速度逐步增加,左心室流场的空间结构变化更加显著^[6-9]。由于重度狭窄患者的左室内径往往是小于正常人,因此,本研究对漩涡的纵径与横径的比值和狭窄程度做了相关性检验,结果表明,狭窄越重,则漩涡越扁长。同理,漩涡中心位置的比值与狭窄程度的相关性检验,表明狭窄越重,漩涡中心位置越远离二尖瓣环连线水平,而接近左心室中心。也就是说,重度狭窄时漩涡越接近左室本身的形态,几乎充满整个左室。由此,通过 VFM 的漩涡显示技术,可直观看到二尖瓣狭窄时左室内血流状态在空间上的不均匀性。

3.2 二尖瓣狭窄人工机械瓣置换术后组 (病例组 1)

VFM 漩涡参数研究结果显示,双叶瓣确实明显改善血流动力学状态,在舒张早期重新显示出对称性小漩涡,与正常对照组相似,但是随后舒张中晚期出现较大快速回旋的漩涡,仍然高于正常对照组,因为即使是功能正常的人工机械瓣,由于瓣叶开放角度有限等原因,对血流仍然存在一定的阻挡,因此,频谱多普勒测量的血流速度明显高于对照组,而 VFM 漩涡最大向量速度在舒张中晚期依然高于正常对照组。

在人工机械瓣置换术后,血流动力学状态有明显改善,但是由于机械瓣的构造与天然瓣膜不



图 6 人工生物二尖瓣左心室内血流旋转方向图

Fig. 6 Left ventricle blood flow rotation direction of bioprosthesis valve prosthesis group

同,且有效瓣口面积还是小于天然二尖瓣,因此,可以观察到形态及速度明显减小的漩涡,但是最大向量速度还是一定程度上高于正常对照组,漩涡的旋转方向也因对称设计的瓣叶,而与对照组相异。

3.3 二尖瓣狭窄人工生物瓣置换术后组 (病例组 2)

二尖瓣人工生物瓣置换术后左心室内流场变化为舒张早期近二尖瓣环处出现 2 个相对靠近二尖瓣瓣环高速密集且对称旋转的小漩涡,与对照组基本相同,舒张中晚期为顺时针旋转速度较密集且多中心的大涡环,漩涡大小、位置、最大向量速度均接近对照组,说明人工生物瓣膜较人工机械瓣膜更接近正常瓣膜的功能,能够更多的改善瓣膜狭窄的血流动力学状态和程度,但人工生物瓣膜仍无对照组舒张中期再次出现小漩涡,左心室内血流主流方向仍为室间隔转向至左室后壁、侧壁再汇入左室流出道,这与正常对照仍有不同^[10-12]。

VFM 图像能显示心室内血液流场的变化,能初步定量研究心腔内复杂流场结构。VFM 技术对正常及异常左心室流场的血液动力学评估有更精确的帮助,同时也可以为二尖瓣狭窄的术前评估、置换瓣膜选择及术后人工瓣膜功能评估提供更详尽的信息。

[参考文献]

- [1] 李小庆,唐红,李晨,等.超声向量血流成像的流体模型定量研究(实验研究)[J].中华医学超声杂志(电子版),2009,6(5):819-824.
- [2] TANAKA, SAKAMOTO, SUGAWARA, et al. Blood flow structure and dynamics, and ejection mechanism in the left ventricle: Analysis using echodopplerography [J]. J Cardiol, 2008, 52(3): 86-101.
- [3] LICP, LUPC, LIUJS, et al. Role of vortex in cavitation formation in the flow across a [J]. J Heart Valve Dis, 2008, 17

- (4):435 – 445
- [4] GE L, RATCLIFFE M. The Use of Computational flow modeling (CFD) to determine the effect of left ventricular shape on blood flow in the left ventricle [J]. *Ann Thorac Surg*, 2009, 87(4): 993 – 994.
- [5] TANAKA M, SAKAMOTO T, SUGAWARA S, et al. Blood flow structure and dynamics, and ejection mechanism in the left ventricle; analysis using echo-dynamography [J]. *J Cardiol*, 2008, 52 (2): 86 – 101.
- [6] MONIN J L, DEHANT P, ROIRON C, et al. Functional assessment of mitral regurgitation by transthoracic echocardiography using standardized imaging planes diagnostic accuracy and outcome implications [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2005, 46(2): 302.
- [7] 叶木奇, 刘晓真, 姜海明, 等. 经食管实时三维超声心动图在二尖瓣脱垂解剖定位中的应用价值[J]. *实用医学杂志*, 2013, 29(11): 1 831 – 1 832.
- [8] BEN-ZEKRY S, NAGUEH S F, LITTLE S H, et al. Comparative accuracy of two-and three-dimensional transthoracic and transesophageal echocardiography in identifying mitral valve pathology in patients undergoing mitral valve repair: initial observations [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2011, 24(10): 1 079 – 1 085.
- [9] MESAS C E, VELOSO H H, DE PAOLA A A. Anticoagulation for atrial fibrillation; underutilization in a Brazilian tertiary outpatient clinic [J]. *Clin Cardiol*, 2004, 27 (11): 592 – 593.
- [10] NESSER H J, MOR-AVI V, GORISSEN W, et al. ventricular volumes using three-dimensional echocardiographic speckle tracking; comparison with MRI [J]. *Eur Heart J*, 2009, 30(13): 1 565 – 1 573.
- [11] 陈剑, 丁云川, 尹帆, 等. 前壁心肌梗塞患者左室壁三维运动与左室流场变化相关性研究[J]. *昆明医科大学学报*, 2014, 35(10): 65 – 69.
- [12] 王庆慧, 丁云川, 陈剑, 等. 三维斑点追踪技术在评价冠心病患者左心室扭转中的应用[J]. *实用医院临床杂志*, 2012, 9(5): 19 – 21.
- (2015 – 03 – 22 收稿)

(上接第 4 页)

- assessment of the changes in the pulmonary circulation [J]. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 1979, 77(1): 109 – 118.
- [9] FASULES J W, TRYKA F, CHIPMAN C W, et al. Pulmonary hypertension and arterial changes in calves with a systemic-to-left pulmonary artery connection [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1994, 77(2): 867 – 875.
- [10] REDDY V M, WONG J, LADDIROAT J R, et al. Altered endothelial-dependent vasorelaxative responses in lambs with pulmonary hypertension and increased pulmonary blood flow [J]. *Am J Physiol*, 1996, 40(7): 562 – 570.
- [11] MICHEL R P, HAKIM T S, HANSON R E, et al. Distribution of lung vascular resistance after chronic systemic-to-pulmonary shunts [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 1985, 249(6): H1 106 – H1 113.
- [12] WILCOX J N. Restenosis and related proliferative vasculopathies Adventitial remodeling associated with restenosis [J]. *Vasc Surg*, 1988, 27(7): 1 652 – 1 664.
- [13] 曲乐丰, 王玉琦. 血管内膜增生的研究进展 [J]. *中华实验外科杂志*, 2002, 19(2): 93 – 94.
- [14] 催进, 张雅洁. 病理学案例版 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 36 – 38.
- [15] 危当恒, 王贵学, 王佐, 等. 剪切应力对家兔血管内膜增生及动脉粥样硬化斑块形成的影响 [J]. *中国动脉硬化杂志*, 2007, 6(14): 410 – 414.
- (2015 – 03 – 10 收稿)