

## 血流向量成像定量评价正常成人左心室涡流特征

张瑜, 丁云川, 王庆慧, 陈剑, 尹帆, 苏璇, 罗庆祚, 李建华, 现丽妮  
(昆明医科大学附属延安医院医学影像科, 昆明市医学超声诊断中心, 云南昆明 650051)

**[摘要]** **目的** 应用血流向量成像 (vector flow mapping, VFM) 技术定量评价正常成年人不同心动周期左心室涡流的变化特征。 **方法** 在 VFM 模式下采集 50 例健康成人心尖三腔与四腔切面彩色多普勒动态图像, 应用配备 VFM5.0 版本分析软件的 DAS-RSI 工作站脱机分析, 观察心动周期不同时相左室腔内涡流的 2D 速度分布、流线、涡量线、涡量、循环、能量损耗、室壁切应力等参数, 分析涡流的变化特征。 **结果** 左室腔内涡流在不同心动周期呈规律变化, 且涡流多持续在等容收缩期, 左心室内部分有涡流的时相中, 涡流横径 (Dx)、纵径 (Dy) 及边缘最大速度 (Vmax) 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ); 循环反应了局部涡流旋转的方向和强度的总和, 即总涡量, 当流速增大时, 循环增大, 循环值的大小取决于指定的闭合曲线的大小; 在涡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; 室壁切应力与正交方向的速度梯度成正比, 红色节段室壁切应力较蓝色节段大。 **结论** VFM 技术可以反映正常人左室腔内涡流变化规律, 为定量评估左室内血流状态提供了一种新的方法。

**[关键词]** 血流向量成像; 涡流; 左心室

**[中图分类号]** R445.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2095-610X(2015)10-0036-05

## Quantitative Evaluation on Left Ventricular Vortex Characteristic in Normal Adults

ZHANG Yu, DING Yun-chuan, WANG Qing-hui, CHEN Jian, YIN Fan, SU Xuan, LUO Qing-yi, LI Jian-hua, XIAN Li-ni

(Dept. of Medical Imaging, The Affiliated Yan'an Hospital of Kunming Medical University, Kunming Medical Ultrasound Diagnosis Center, Kunming Yunnan 650051, China)

**[Abstract]** **Objective** To evaluate quantitatively the left ventricular vortex changes characteristic in normal adults using vector flow mapping (VFM). **Methods** Fifty normal adults were examined by ALOKA a-10 ultrasonic diagnostic system. The color Doppler loops in apical three- and four-chamber view were Recorded and then analyzed off-line by VFM software version 5.0 in DAS-RSI system. The evolutions of left ventricular vortex within each phase of the cardiac cycle, and 2D velocity distribution, stream line, vorticity line, vorticity, circulation, energy loss and wall shear stress were observed. **Results** Left ventricular vortex showed regular changes within the cardiac cycle. The vortex mostly lasted during the isovolumic contraction interval. The transverse diameter (Dx), longitudinal diameter (Dy) and the maximum speed (Vmax) of the edge were significantly different in some cardiac cycles ( $P < 0.05$ ). Circulation reflect the direction and the intensity of rotation of the local vortex, namely the total vorticity, circulation increase when the flow rate increases, circulation value also depends on the size of the specified closed-curve. At the site of large changes in vorticity is accompanied by greater energy loss, and the energy loss of laminar flow is smaller. Wall shear stress is directly proportional to the velocity gradient on the orthogonal direction, and the wall shear stress of red-color ventricular segment is higher than that of the blue-color segment. **Conclusion** The VFM technology can be used to observe the change rules of left

**[基金项目]** 云南省科技厅-昆明医科大学应用基础研究联合专项基金资助项目 (2012FB100)

**[作者简介]** 张瑜 (1981~), 女, 云南石屏县人, 医学硕士, 主治医师, 主要从事心血管超声临床工作。

**[通讯作者]** 丁云川. E-mail: dd82109@yahoo.com.cn

ventricular vortex, and may serve as a novel approach to quantitatively evaluate the flow state.

**[Key words]** Vector flow mapping; Vortex; Left ventricle

以往超声心动图多注重评价心脏整体或局部的室壁运动, 对心腔内流体力学变化的研究较少, 且常规多普勒超声亦无法准确描述心室内血流流场变化. 血流向量成像 (vector flow mapping, VFM) 技术可将血流分解为流入观测平面的基本流和平面内封闭的涡流<sup>[1]</sup>, 通过向量图及流线图模式评价心腔血流动力学变化, 直观显示出心腔内的血流特点. 新的 VFM5.0 版本结合运用流体力学原理和组织追踪技术建立起来的心腔内血液流场可视化分析方法, 可清晰地在二维平面观测域内测量任意部位、任意时刻立体空间血流的速度向量的情况, 判断血流状态和性质, 为研究心血管系统的血流动力学提供了一个简便、快捷的分析方法. 本研究就运用 VFM 技术对正常成人左心室的涡流特征进行观察, 探讨该技术的临床应用价值.

## 1 资料与方法

### 1.1 病例资料

选取 2013 年 3 月至 2014 年 6 月到昆明医科大学附属延安医院医健康体检的 50 例健康成人, 男性 23 例, 女性 27 例, 平均年龄 ( $31.07 \pm 10.51$ ) 岁. 入选标准为无心血管病史, 心电图及超声心动图检查正常, 血常规检查无血脂、血糖等生化指标异常; 排除标准: (1) 经胸透声差, 图像不清晰; (2) 患有心律失常、先天性心脏病、各型心肌病、心脏瓣膜病、冠心病、高心病、肺心病及心包疾病等; (3) 非循环系统疾病引发的心脏病, 如糖心病、甲心病等; (4) 其他心脑血管疾病.

### 1.2 仪器与方法

**1.2.1 仪器** 采用 Aloka a10 彩色多普勒超声成像系统, UST 52105 心脏探头, 频率 1.88 ~ 4.02 MHz. 采集数据由 VFM 软件 5.0 版本 DAS-RSI 图像分析工作站脱机分析.

**1.2.2 数据采集与方法** (1) 彩色多普勒超声检查: 受检者左侧卧位, 平静呼吸, 同步检测心电图, 行常规超声心动图检查, 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, 测量计算平均值进行统计学处理. 受检者左侧卧位, 连接同步心电图. 结

合心电图确定心动周期并完成常规心脏彩超测量; (2) VFM 检查: 新的 VFM5.0 版本结合运用流体力学原理和组织追踪技术, 因此于心尖三腔、四腔切面采集动态彩色多普勒血流图像时, 二维超声图像扇角及彩色多普勒取样框应尽量大, 以能完整包含左室壁为准, 深度以包括二尖瓣环为宜, 并适当提高二维超声及彩色血流图的空间分辨率, 帧频是最次要考虑的因素, 可低至 ( $15 \pm 5$ ) 帧/s, 记录 3 ~ 5 个心动周期. 将彩色多普勒脉冲重复频率调到无混叠, 嘱患者屏住呼吸时存储图像, 记录 3 个心动周期存储于移动硬盘后脱机分析经过 DSA-RS1 软件脱机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; (3) 涡流描述参数的测量: 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涡流描述参数的获得. 单一屏幕上最多可同时显示 7 个涡流. 为清晰显示流场内变化, 涡流图选取 VFM 等流量线值为  $3 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 涡流精细度值 ( $T$ ) = 1; 局部线速度分布图取 VFM 等流量线值为  $60 \text{ cm}/\text{s}$ ,  $T = 1$ , 疏密度值 ( $D$ ) = 3. 选择涡流横径 ( $D_x$ , 通过涡流中心左右方向的最大直径)、涡流纵径 ( $D_y$ , 通过涡流中心垂直于横径的最大直径)、涡流最大向量速度 ( $V_{\max}$ ) 等 3 个涡流描述参数; ③涡量 (Vorticity) 及涡量线 (Vorticity line). 涡量描写局部涡流旋转的强度和方向, 单位是  $\text{s}^{-1}$ , 蓝色和红色分别表示顺时针和逆时针方向. 涡量线是涡量的轮廓线, 显示局部涡流旋转的强度, 绿色和黄色分别表示顺时针和逆时针方向; ④循环 (Circulation) 和能量损耗 (Energy loss). 循环是任意血流闭合曲线上切线方向的速度分量的速度积分, 反应了局部涡流旋转的方向和强度的总和, 即总涡量, 相当于被闭合曲线封闭的任意平面上涡量的垂直分量, 循环值的大小取决于指定的闭合曲线的大小, 单位是  $\text{m}^2/\text{s}$ ; 能量损耗是单位时间和单位体积内工作负荷的值<sup>[2]</sup>, 单位是  $\text{N} \cdot \text{m}/\text{s}/\text{m}^2$ ; ⑤室壁切应力 (wall shear stress, WSS) 是估算与室壁成正交方向上的速度梯度, 单位是  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ , 数值大小可以用不同

颜色表示, 红色为速度梯度值较高, 蓝色反之。

### 1.3 统计学处理

所有计量资料都以均数  $\pm$  标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示, 采用 SPSS 软件包对各参数间进行随机区组设计方差分析, 若有差别, 进一步两两比较,  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 正常人心动周期各时相涡流分布及特征

左室内部分有涡流的时相中涡流纵径、横径及边缘最大速度参数 ( $\bar{x} \pm s$ ) 见表 1。等容舒张期左室内的涡流不明显, 多显示朝向心尖的血流, 仅在二尖瓣前叶下方可见短暂的小涡流; 快速充

表 1 50 例患者左室内部分心动周期中涡流横径 (Dx)、纵径 (Dy) 及边缘最大速度 (Vmax) 比较 ( $\bar{x} \pm s$ )

Tab. 1 Differences of the transverse diameter (Dx), longitudinal diameter (Dy) and the maximum speed (Vmax) of the edge in some cardiac cycles of 50 normal adults ( $\bar{x} \pm s$ )

心动周期	Dx(mm)	Dy(mm)	Vmax(mm/s)
快速充盈期	21.14 $\pm$ 5.10*	12.69 $\pm$ 5.21*	13.42 $\pm$ 2.01
缓慢充盈期	37.02 $\pm$ 6.95*	33.29 $\pm$ 7.48*	15.23 $\pm$ 1.87
房缩期	27.14 $\pm$ 5.86*	21.35 $\pm$ 6.22*	11.98 $\pm$ 1.74
等容收缩期	28.94 $\pm$ 4.62	18.76 $\pm$ 5.47*	8.66 $\pm$ 1.59
快速射血期	26.30 $\pm$ 5.74	15.68 $\pm$ 3.65*	8.14 $\pm$ 1.65

与 Vmax 比较, \* $P < 0.05$ 。

盈期二尖瓣前后叶下方出现 2 个局部小涡流, 前叶下方涡流出现率较高; 缓慢充盈期左室腔内可见一个大涡流, 占据大部分左室腔; 房缩期二尖瓣前叶下方出现一个小涡流, 偶也可见于后叶下方。快速充盈期、缓慢充盈期及房缩期 3 个心动周期涡流横径、纵径和边缘最大速度等参数的差异均有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。等容收缩期以涡流为主, 左心室流出道内近二尖瓣前叶下方出现一个相对较小的涡流, 涡流持续存在, 强度随时间增加; 快速射血期涡流更靠近二尖瓣前叶下方近室间隔侧可见局部小涡流, 此涡流与等容收缩期的涡流位置、大小均相似, 于射血中期消失。等容收缩期及快速射血期 2 个心动周期涡流横径差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ ), 但涡流纵径与边缘最大速度差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。缓慢射血期基本无涡流。

### 2.2 涡量及涡量线

从图 1 可以看出, 左室内的涡流旋转方式为顺时针 (蓝色) 和逆时针 (红色) 方向同时存在。等容舒张期涡量的强度无论方向如何均较小, 且集中于二尖瓣前叶瓣下; 快速充盈期涡量的强度和范围都急速增加, 充满整个左室心腔, 涡量相对杂乱, 但近两侧室壁多为顺时针方向, 心腔中央多为逆时针方向; 房缩期心尖区涡量开始减少, 顺时针方向涡量开始向左室侧壁移动, 逆时针方向涡量仍处于心腔中央; 等容收缩期顺时针方向涡量多位于左室侧壁, 而逆时针方向涡量集中于室间隔侧, 准备向主动脉射血; 快速和缓慢射血期涡量分别较类似于快速充盈期和等容舒张期。

### 2.3 循环及能量损耗

循环反应了局部涡流旋转的方向和强度的总和, 即总涡量, 当流速增大时, 循环增大, 循环值的大小取决于指定的闭合曲线的大小; 在涡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。

### 2.4 室壁切应力

室壁切应力与正交方向的速度梯度成正比, 红色节段室壁切应力较蓝色节段大, 见图 2。等容舒张期心腔内涡流对左室壁的 WSS 均处于低值; 快速充盈期左室壁的 WSS 均开始普遍有所增加; 房缩期 WSS 增加幅度较大的节段开始向室壁中间段和基底段集中; 等容收缩期左室侧壁的 WSS 明显增强, 而进入快速射血期之后则转为室间隔侧的 WSS 较强; 缓慢射血期 WSS 情况类似于等容舒张期。

## 3 讨论

心腔内涡流的形成与心脏的解剖结构、心肌运动、心电生理及心功能等因素有关<sup>[3]</sup>。快速充盈期, 血流快速进入左室, 高速血流与周边相对静止的血流之间形成剪切力, 在流入道血流束两侧形成涡流<sup>[4]</sup>。到房缩期, 左房将血液再次快速泵入左室, 涡流分布范围加大, 涡流强度也大于舒张早期。等容收缩期, 左室呈密闭腔, 但血流并不是静止的, 而是通过形成整体涡流, 将血流导向流出道<sup>[5]</sup>, 实现血流的转向及能量蓄积, 为收缩期射血做准备<sup>[6]</sup>, 因此出现布满大部分室腔的密集大涡流, 涡流强度大于舒张期。快速射血期, 血流经左室流出道迅速泵入主动脉, 在主动脉瓣口形

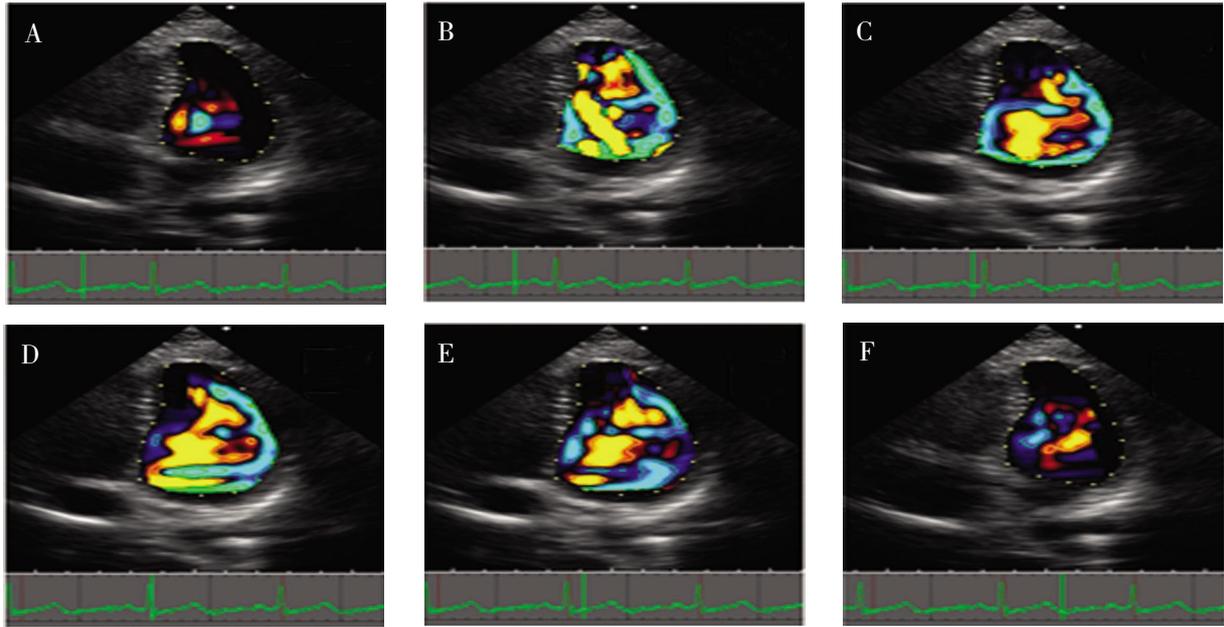


图 1 不同心动周期左室内涡流的涡量和涡量线比较

Fig. 1 Comparison of vorticity and worticity line of left ventricular vortex in different cardiac cycles

A: 等容舒张期; B: 快速充盈期; C: 房缩期; D: 等容收缩期; E: 快速射血期; F: 缓慢射血期.

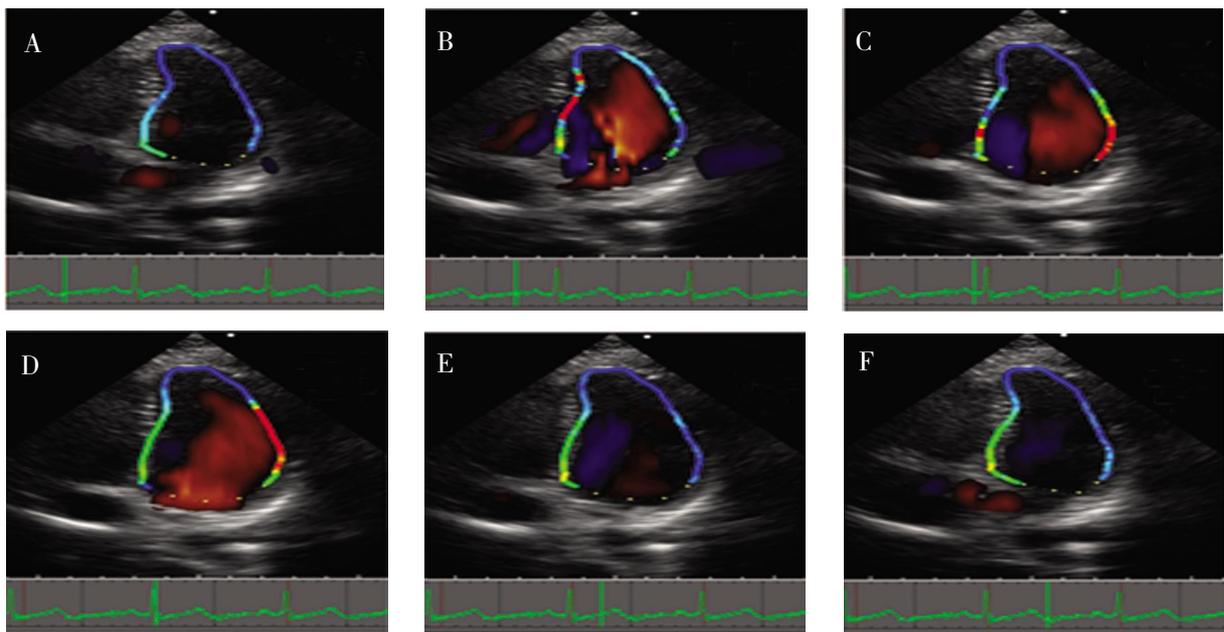


图 2 不同心动周期左室内涡流的室壁切应力比较

Fig. 2 Comparison of wall shear stress of left ventricular vortex in different cardiac cycles

A: 等容舒张期; B: 快速充盈期; C: 房缩期; D: 等容收缩期; E: 快速射血期; F: 缓慢射血期.

成高强度的小涡流, 可能是由于高速血流冲击主动脉瓣口静止的血液形成. 随着瓣口顺利开放, 血流以流畅的层流进入主动脉, 涡流消失. 等容收缩期及收缩期, 在二尖瓣后叶下方, 形成局部低强度的小涡流, 维持二尖瓣瓣叶关闭<sup>7</sup>.

李小庆等<sup>8</sup>经体外实验证实: 在一定流量范围内, VFM 估测流量与实际流量一致, 证实了 VFM

技术对流体动力学特征的模拟非常准确, 并探讨了不同增益条件对 VFM 测量的影响. 本研究首先在对左心室内不同心动周期中涡流横径 ( $D_x$ )、纵径 ( $D_y$ ) 及边缘最大速度 ( $V_{max}$ ) 等参数的研究上与先前的类似研究结果基本一致<sup>9,10</sup>. 其次, 在基于组织追踪技术建立起来的室壁切应力 (WSS) 方面的研究表明, 等容舒张期心腔内涡流对左室

壁的 WSS 均处于低值,但其内血流也非处于静止状态,而是在进行血流的转向及能量蓄积,为下一次的收缩期射血做准备,这表现在从该时期过渡到快速充盈期这一阶段心腔内血流对左室壁的 WSS 均开始普遍有所增加的变化上;之后 WSS 明显增强的室壁节段从房缩期的室壁中间段和基底段,到等容收缩期的左室侧壁,再到快速射血期之后则转为室间隔侧的变化,均表明了心腔内血流的转向及能量蓄积的一连串转变.值得注意的是,左室心尖区室壁在 WSS 方面自始至终没有太大的变化.最后,左室内的涡流旋转方式和强度的改变也正好与 WSS 的转变过程相契合,涡流的强度和方向与室壁切应力大小正好对应.

VFM 技术目前仍有一定的局限性,其新的 VFM 软件 5.0 版本虽新增加了循环、能量损耗等参数的原理本是基于“单位时间和单位体积内的工作负荷”,但因其仍是基于常规超声心动图所获得的二维彩色多普勒血流图来实现的,分析的是二维血流速度的空间分布,不能用来三维的涡流状态,使得该参数的可信度又有待于该技术的发展.此外,VFM 技术仅能处理层流血流,然而目前其基于质量守恒定律连续方程计算垂直于声束方向血流速度成分,不用再将血流分为基本流和涡流的改进,让我们更加期待有朝一日 VFM 技术能运用于对心腔内湍流的研究.

综上所述,血流向量成像技术(VFM)可以反映正常人左室腔内涡流变化规律,为临床定量评估左室内血流状态提供了一种新的方法,远期更有望于在各类心脏疾病的临床诊疗中发挥有益和举足轻重的作用.

#### [参考文献]

- [1] OHTSUKI S, TANAKA M. The flow velocity distribution from the Doppler information on a plane in three-dimensional flow[J]. J Visual, 2006, 9(1): 69 - 82.
- [2] THONDA, K ITATANI, K MIYAJI, MASAHIRO ISHII, et al. Assessment of the vortex flow in the post-stenotic dilatation above the pulmonary valve stenosis in an infant using echocardiography vector flow mapping [J]. Eur Heart, 2014, 35(5): 306.
- [3] 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]. Cardiol, 2008, 52(2): 86 - 101.
- [4] DOMENICHINI F, PEDRIZZETTI G, BACCANI B. Three-dimensional filling flow into a model left ventricle [J]. Fluid Mech, 2005, 539(9): 179 - 198.
- [5] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. Annu Rev Fluid Mech, 1991, 23(1): 261 - 304.
- [6] 陈璐璐, 钱蕴秋, 张海滨, 等. 应用血流向量图技术分析正常人左心室血流动力学特点[J]. 中华超声影像学杂志, 2009, 18(10): 829 - 831.
- [7] SUGAWARA M, NIKI K, OHTSUKI N, et al. Clinical usefulness of wave intensity analysis [J]. Med Biol Eng Comput, 2009, 47(2): 197 - 206.
- [8] 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[J]. 中华医学超声杂志, 2009, 6(5): 12 - 14.
- [9] 戴莹, 郭薇. 血流向量成像技术在正常人左心室涡流特征研究中的应用 [J]. 福建医药杂志, 2013, 35(5): 6 - 8.
- [10] 刘晓宁, 李治安, 何怡华, 等. 运用血流向量成像技术评价正常人左心室涡流状态[J]. 国际生物医学工程杂志, 2012, 35(5): 280 - 283.

(2015 - 03 - 10 收稿)