

文章编号: 1004-7220(2020)06-0744-06

左室收缩末期生物力学变化与舒张性心衰发病机制的相关性

桂艳霞¹, 司效东²

(1. 内蒙古科技大学 包头医学院第二附属医院, 科研科, 内蒙古 包头 014030;
2. 内蒙古医科大学 基础医学院, 病理生理学教研室, 呼和浩特 010100)

摘要:目的 分析原发性高血压患者左心室收缩末期最大心肌刚度(maxEav)、最大弹性模量(E_{\max})与二尖瓣环舒张早期与心房收缩期峰值速度比(E/A)的相关性。方法 选取298例原发性高血压患者作为研究对象,计算患者的左室质量指数(left ventricular mass index, LVMI)和相对室壁厚度(relative wall thickness, RWT),并基于LVMI和RWT指标分成4组,分别为正常结构(left ventricular normal, LVN)、向心性重构(left ventricular concentric remodeling, LVCR)、离心性肥厚(left ventricular eccentric hypertrophy, LVEH)、向心性肥厚(left ventricular concentric hypertrophy, LVCH)。另选取115名健康人入对照组。对入选者进行超声心动图诊断,分析maxEav、 E_{\max} 与 E/A 之间的相关性。结果 LVCR、LVEH、LVCH 3组研究对象maxEav、 E_{\max} 与 E/A 均呈现负相关。LVCR组、LVCH组与对照组间 E/A 比较,差异具有统计学意义。与对照组相比,高血压各组maxEav、 E_{\max} 均减小,差异具有统计学意义。结论 maxEav、 E_{\max} 是判断左室舒张功能更为敏感且简便易得的指标。分析高血压左室重构合并舒张功能异常患者maxEav、 E_{\max} 变化,探索舒张性心衰的发病机制,可以为今后预防及治疗舒张性心衰提供理论依据。

关键词:最大心肌刚度;最大弹性模量;原发性高血压;左心室舒张功能

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.06.015

Correlation between Biomechanical Changes at the End of Left Ventricular Systole and Pathogenesis of Diastolic Heart Failure

GUI Yanxia¹, SI Xiaodong²

(1. Department of Research, the Second Affiliated Hospital of Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014030, Inner Mongolia, China; 2. Department of Pathophysiology, College of Basic Medicine, Inner Mongolia Medical University, Huhhot 010100, China)

Abstract: Objective To analyze the correlation of the maximum myocardial stiffness (maxEav), maximum modulus of elasticity (E_{\max}) with the E/A ratio of mitral annulus at the end of left ventricular systole for patients with essential hypertension. **Methods** 298 patients with essential hypertension were selected as research objects. The left ventricular mass index (LVMI) and relative wall thickness (RWT) of the patients were calculated. Based on LVMI and RWT indexes, the patients were divided into left ventricular normal (LVN) group, left ventricular concentric remodeling (LVCR) group, left ventricular eccentric hypertrophy (LVEH) group, left ventricular concentric hypertrophy (LVCH) group, respectively. In addition, 115 healthy subjects were selected into control group. The subjects were diagnosed by echocardiography, so as to analyze the

收稿日期:2020-02-03;修回日期:2020-02-14

通信作者:司效东,副教授,E-mail: nmsxd@163.com

correlation of maxEav, E_{\max} with E/A . **Results** The maxEav, E_{\max} and E/A in LVCR group, LVEH group and LVCH group were all negatively correlated. The differences of E/A between LVCR group, LVCH group and control group showed statistical significance. Compared with control groups, both the maxEav and E_{\max} in hypertension group decreased, and the difference was statistically significant. **Conclusions** The maxEav and E_{\max} are more sensitive and easy indexes to judge left ventricular diastolic function. The analysis on maxEav and E_{\max} changes in patients with left ventricular remodeling and diastolic dysfunction in hypertension, as well as the exploration on pathogenesis of diastolic heart failure, can provide the theoretical basis for prevention and treatment of diastolic heart failure in the future.

Key words: maximum myocardial stiffness (maxEav); maximum elastic modulus (E_{\max}); essential hypertension; left ventricular diastolic function

舒张性心力衰竭(diastolic heart failure, DHF)通常是指一种由于动静脉系统血液淤积和灌注不足造成的心脏循环障碍症候群,其常见症状为左心室舒张末期压增高、患者心搏量减少,主要原因是左心室心肌细胞肥大纤维化,顺应性降低,舒张期主动松弛能力受损^[1]。相关统计数据显示,在全球范围内的心力衰竭患者中,超过 50% 为舒张性心力衰竭,DHF 发病率呈现出逐年上升的趋势,其年死亡率约为 8%,而伴有收缩功能障碍的心力衰竭患者年死亡率为 19%^[2]。

当前无创评估舒张功能的方法主要有组织多普勒成像(tissue Doppler imaging, TDI)技术、超声斑点追踪成像(speckle tracking imaging, STI)技术等。测量参数包括早期二尖瓣血流速度(E)、二尖瓣环舒张早期与心房收缩期峰值速度比(E/A)、减速时间(deceleration time, DT)、左心房容积(left atrial volume, LAV)、心肌做功指数(Tei 指数),均受到成像技术的限制^[3-4]。测定心肌的生物力学指标包括速度、应变及应变率,用来评价心肌舒张功能。但上述技术均有各自的缺陷,受到声速方向、室壁运动方向、间夹角等因素的影响。舒张性心衰时,有关舒张功能的定量参数指标尚无统一论。因此,为了实现更加有效准确地对舒张性心力衰竭进行临床诊断、评价及治疗,构建左心室舒张功能评价参数指标的重大意义。

在我国力学生物学领域,已对心血管的应力-应变关系展开深入研究,并基于心血管系统所受力学环境的影响变化,对力学因素与心血管系统重构之间的生物学效应进行阐述说明,探讨力学因素对心血管重构作用的调控机制以及信号转导通路,并期

望发现新的生物标记物^[5]。学者们通过分析左室收缩末期应力-应变关系并建立关系函数线发现,两者之间表现为线性关系,直角坐标系下应力-应变的曲线斜率称为最大心肌劲度(maxEav);分析心室收缩末期压力-容积关系并建立关系函数线发现,两者之间同样表现为线性关系,直角坐标系下压力-容积的曲线斜率称为心肌最大弹性模量(E_{\max}),是反映单位心肌收缩状态的生物力学指标。心脏构型变化不会对 maxEav、 E_{\max} 产生影响^[6]。心脏左心室松弛开始于左室收缩后期,左心室的舒张期与收缩期之间具有一个心肌僵硬程度减低的过渡阶段。这也说明收缩功能的变化影响舒张功能,即收缩末期 maxEav、 E_{\max} 的变化影响左室舒张的实现。因此,研究舒张性心力衰竭过程中生物力学指标的变化,可以实现无创条件下对心肌舒张功能进行评价,探索舒张性心力衰竭的发病机制。

1 材料与方法

1.1 研究对象

1.1.1 资料来源 全部病例均来自 2018 年 1~11 月在包头医学院第二附属医院门诊、住院部收治的 298 例原发性高血压患者,年龄(51.94 ± 3.85)岁,年龄比较无显著差异,故研究对象均衡性及可比性较好。另选取健康管理中心体检诊断的 115 名健康人作为对照组。入组者均填写知情同意书。

1.1.2 入选及分组情况 对患者的左室质量指数(left ventricular mass index, LVMI)和相对室壁厚度(relative wall thickness, RWT)进行诊断,并根据 LVMI 和 RWT 指标,按照 Ganau 分型标准将患者分

组。① 正常构型(left ventricular normal, LVN)组:共101例,其中男59例,女42例,平均年龄(52.15±3.81)岁。LVMI正常(男BMI<131 g/m²,女BMI<100 g/m²),RWT≤0.45;② 向心性重构(left ventricular concentric remodeling, LVCR)组:共88例,其中男55例,女33例,年龄(51.95±4.16)岁。LVMI正常,RWT≥0.45;③ 向心性肥厚(left ventricular concentric hypertrophy, LVCH)组:共42例,其中男20例,女22例,年龄(52.14±3.67)岁。LVMI增加(男BMI≥131 g/m²,女BMI≥100 g/m²),RWT≥0.45;④ 离心性肥厚(left ventricular eccentric hypertrophy, LVEH)组:共67例,其中男28例,女39例,年龄(52.33±3.36)岁。LVMI增加,RWT<0.45。

对照组为健康管理中心体检诊断的115名健康人员,心电图、血糖、血脂等检查均正常。其中男65例,女50例,年龄(51.14±4.23)岁。

1.2 仪器设备

荷兰进口北京迈润医疗医疗器械有限公司生产的飞利浦CX50彩色超声诊断仪。台式水银柱血压计。

1.3 研究方法

1.3.1 病史采集及体格检查 对298例原发性高血压患者和115名健康人的一般资料进行收集,每名入选者均记录姓名、性别、年龄,询问有无冠心病、糖尿病等病史以及家族史、服药史。对患者的身高、体质量、体表面积(body surface area, BSA)进行测量计算。其中,BSA计算公式如下:

$$BSA(m^2) = 0.006 \times \text{身高}(cm) + 0.012 \times \text{体质量}(kg) - 0.1529$$

1.3.2 血压测量 对台式水银柱血压计进行调试校正后,对298例原发性高血压患者以及115名健康人的血压进行测量。被测量人员保持静息状态。最终测量结果的确定通过多次测量取平均值得到。选择每间隔2~3 min测量1次,连续测量3次。以测量得到的舒张压和收缩压作为计算参数求取左心室收缩末期压力(p_{es}),其计算公式如下:

$$p_{es} = (SBP - DBP) / 3 + DBP$$

其中:SBP(systolic blood pressure)为收缩压;DBP(distolic blood pressure)为舒张压,单位均为mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)。

1.3.3 多普勒超声心动图检测 采用飞利浦CX50彩色超声诊断仪对298例原发性高血压患者以及115名健康人心动图进行测量。被测人员取左侧卧位,平静呼吸。为减少干扰,所有实验组检查前停用降压药5 d。对5组研究对象进行常规二维超声检查,胸骨旁左室长轴切面。四腔心切面。受试者体位不变,将取样容积置于心尖四腔切面左室侧,测量二尖瓣血流频谱舒张早期最大峰值速度(E ,单位cm/s)以及二尖瓣血流频谱舒张晚期最大峰值速度(A ,单位cm/s),计算 E/A 的比值。

为了避免测量误差等随机因素造成的测量不准,采用多次测量取平均值的方法对测量准确性进行保障,连续测量3个心动周期。根据测量的结果,对左室质量、LVMI、RWT分别进行计算求解。此操作由具有医师资质的医生一人独立完成,减小操作的误差。

1.4 统计方法

采用SPSS 22.0软件对数据进行统计学分析,用均数±标准差表示计量数据。通过方差分析进行组内两两比较。计数资料组间比较用卡方检验,两变量相关分析采用Pearson相关系数,通过 t 检验或者校正 t 检验进行组间两两比较, $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 $\max E_{av}$ 、 E_{\max} 与 E/A 相关性分析

对照组: $\max E_{av}$ 、 E_{\max} 与 E/A 比较无显著相关性($P>0.05$);LVEH组: $\max E_{av}$ 与 E/A 呈显著负相关($r=-0.417, P<0.01$);LVEH组: E_{\max} 与 E/A 无显著相关性($P>0.05$);LVCH组: $\max E_{av}$ 与 E/A 呈显著负相关($r=-0.366, P<0.05$);LVCH组: E_{\max} 与 E/A 呈极显著负相关($r=-0.491, P<0.01$);LVCR组: $\max E_{av}$ 与 E/A 呈极显著负相关($r=-0.404, P<0.01$), E_{\max} 与 E/A 呈显著负相关($r=-0.235, P<0.05$)。

2.2 E_{\max} 、 $\max E_{av}$ 与 E/A 比较

LVN组、LVCR组、LVEH组、LVCH组与对照组间 E_{\max} 和 $\max E_{av}$ 与 E/A 比较:LVCR组、LVCH组与对照组间 E/A 差异显著,具有统计学意义($P<0.05$),其余组间 E/A 没有明显差异,不具有统计学意义($P>0.05$)。LVEH组与LVCH组比较, E_{\max} 差异没有统计学意义($P>0.05$), $\max E_{av}$ 差异有统计

表1 各组间 E_{\max} 、maxEav 和 E/A 相关性分析 (* $P<0.05$, ** $P<0.01$)Tab.1 Correlation analysis of E_{\max} , maxEav and E/A among groups

组别	n/例	E_{\max}	maxEav
对照组	115	-0.105	-0.178
LVN 组	101	0.094	0.100
LVCR 组	88	-0.235*	-0.404**
LVEH 组	67	-0.218	-0.417**
LVCH 组	42	-0.491**	-0.366*

学意义($P<0.05$); LVN 组 maxEav、 E_{\max} 与 E/A 比较, 差异没有统计学意义($P>0.05$)。LVEH 组 maxEav、 E_{\max} 与 E/A 与其他组相比, 显著增大, 差异有统计学意义($P<0.05$)。LVCH 组 maxEav、 E_{\max} 与其他组相比, 显著增大, 差异有统计学意义($P<0.05$); 与对照组相比, 高血压各组 maxEav、 E_{\max} 逐级增大, 差异有统计学意义($P<0.05$), 见表 2。

表2 高血压各组与对照组 E_{\max} 、maxEav 与 E/A 比较Tab.2 Comparison of E_{\max} , maxEav and E/A between hypertension groups and control group

组别	n/例	E_{\max}	maxEav	E/A
对照组	115	4.13±1.53	226.92±48.46	1.19±0.2
LVN 组	101	4.7±1.64 ^a	309.08±56.87 ^a	1.06±0.19 ^a
LVCR 组	88	5.21±1.97 ^{a,b}	313.73±62.28 ^a	0.89±0.16 ^{a,b}
LVEH 组	67	5.58±1.57 ^{a,b}	329.03±71.58 ^{a,b}	0.91±0.18 ^b
LVCH 组	42	5.68±1.60 ^{a,b}	322.66±52.73 ^a	0.82±0.16 ^{a,b,c}
<i>F</i>		12.261	50.927	55.090
<i>P</i>		0.000	0.000	0.000

注: ^a 与对照组比较, $P<0.05$; ^b 与正常构型组比较, $P<0.05$; ^c 与向心性重构组比较, $P<0.05$

2.3 假性正常化组与对照组 E_{\max} 和 maxEav 比较

本研究中将负荷 $1<E/A<2$ 的对象分为假性正常化组、对照组。对两组 maxEav、 E_{\max} 进行差异性分析, LVN 组、LVCR 组可表现为 $1<E/A<2$, 也可表现 $E/A<1$ 。LVEH 组、LVCH 组可表现 3 种血流模式: 早期, $E/A<1$; 中期, 房室压差增大, $1<E/A<2$; $E/A>2$ 为限制性充盈。二尖瓣血流频谱为 $1<E/A<2$ 的对照组有 78 例, 原发性高血压组有 108 例, 称为假性正常化组。比较假性正常化组与对照组间 maxEav、 E_{\max} 发现, 假性正常化组 maxEav、 E_{\max} 均显著高于对照组, 差异有统计学意义($P<0.05$), 见表 3。

表3 假性正常化组与对照组间 E_{\max} 、maxEav 比较Tab.3 Comparison of E_{\max} and maxEAV between pseudonormalization group and control group

组别	n	E_{\max}	maxEav
假性正常化组	108	4.97±1.79	350.59±70.99
对照组	78	4.13±1.64	304.61±45.25
<i>t</i>		-3.271	-5.384
<i>P</i>		0.001	<0.001

3 讨论

3.1 高血压伴舒张性心衰

高血压病人由于外周阻力升高导致心脏后负荷增加, 引起向心性肥厚, 导致心脏左心室舒张期松弛性受到损伤, 收缩力下降, 舒张及收缩功能受到影响^[7]。血流动力学改变、心肌细胞肥大等也是导致高血压伴舒张性心衰的原因^[8]。其中, 由于高血压引起左室重构从而导致心力衰竭不容忽视。原发性高血压发病过程中, 神经-体液系统伴随血流动力学的改变发生异常。伴随着周围血管阻力增加, 心脏后负荷增加, 进而引起心腔扩大, 导致左心室重构^[9]。左室重构是心脏的一种代偿性变化, 舒张期延长, 充盈压升高, 充盈减少, 引起舒张功能障碍^[10]。Voorhees 等^[11]研究发现, 心室压力-容积曲线偏移使心室肥厚, 产生心室形状改变是引起左心室舒张功能障碍的原因之一。而心室舒张的缓慢充盈主要是由心肌的僵硬特性所决定, 其中心肌弹性蛋白与胶原纤维比值降低在原发性高血压患者中尤为突出, 直接导致左心室心肌僵硬增加。综上所述, 考虑力学因素对心血管系统的影响, 以心室重构为基础的心衰生物力学研究具有重要的临床意义。

3.2 E/A 与舒张性心衰

目前评价高血压病患者左室舒张功能指标是二尖瓣环舒张早期与心房收缩期峰值速度比 E/A 。本研究中, 将负荷 $1<E/A<2$ 的对象分为假性正常化组、对照组。通过两组 maxEav、 E_{\max} 的差异性分析发现, 假性正常化组 maxEav、 E_{\max} 均显著高于对照组($P<0.05$)。虽然两组二尖瓣血流频谱均表现为 $1<E/A<2$, 但是两组的心室室壁应力却有显著差异。该结果提示, 在二尖瓣频谱评价左心室舒张功能时, 由于受到左心室负荷状态的影响, 尤其是当左心房压力明显增高而出现假性正常化时, 最大心肌

劲度、最大弹性模量或许可以作为一个鉴别假性正常化且评估左心室舒张功能的生物力学指标。

3.3 maxEav 与舒张性心衰

本研究结果显示, maxEav 随着高血压左心室压力负荷的增加而增加。原发性高血压各组 maxEav 均比对照组显著增加 ($P < 0.05$)。心脏病患者发生高血压病时, 神经-体液系统伴随血流动力学改变发生异常, 周围血管阻力增加, 心脏后负荷增加, 从而引起心腔扩大, 导致左心室重构。左室重构是心脏的一种代偿性变化, 充盈压升高, 舒张期延长, 充盈减少, 引起舒张功能障碍。而心室舒张的缓慢充盈主要是由心肌的僵硬特性所决定^[12]。在本研究中, LVEH 组与对照组 maxEav 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。正是由于 LVEH 组长期压力负荷过重, 导致左心室松弛性及顺应性均降低, 左心房收缩不全, 压差增大。与对照组相比, 高血压各组 maxEav 逐级增大, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 说明应力-应变曲线斜率变大导致心肌收缩力增加是引起左心室舒张功能障碍的原因之一。

左心室收缩末期 maxEav 与 E/A 的相关性分析表明, LVEH 组和 LVCR 组 maxEav 与 E/A 呈极显著负相关 ($r = -0.404, P < 0.01$), 推测原因如下: 在心室收缩末期后负荷增大形成压力的基础上, 心肌纤维缩减, 应力增大导致排空受损。Genet 等^[13]认为, 心肌应力与心肌收缩功能相关。Strauer 等^[14]提出室壁应力的概念, 他们指出总的心肌能量需求取决于心肌内壁张力、心肌的肌力状态和心率, 是心肌耗氧量的主要决定因素。室壁应力理论可以用来解释压力负荷过重时室壁肥厚和进行性扩张型心力衰竭的发展。后负荷增加, 可以降低收缩射血。前负荷增加, 每搏量增加。心肌收缩力增加的直接结果是使得应力-应变曲线斜率变大。因此, 收缩末期 E_{\max} 增加或减低与左心室舒张功能障碍的发生密切相关, 故研究收缩末期 E_{\max} 的变化与心衰早期的发生有重要意义。

3.4 E_{\max} 与舒张性心衰

本文结果表明, E_{\max} 随着高血压左心室压力负荷的增加而增加。原发性高血压各组 E_{\max} 均比对照组显著增加 ($P < 0.05$)。由于其受到心肌质量和大小的影响, 不能有效地评价肥厚心肌, 故 LVEH 组与 LVCH 组 E_{\max} 差异没有统计学意义 ($P > 0.05$)。

同时, LVN 组与 LVCH 组 E_{\max} 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。LVCH 组 E_{\max} 与其他组相比, 显著增大, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$); 与对照组相比, 高血压各组 E_{\max} 逐级增大, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 说明心室压力-容积曲线偏移使心室肥厚, 产生心室形状改变, 引起左心室舒张功能障碍, 从而导致心力衰竭。

通过左心室收缩末期 E_{\max} 与 E/A 的相关性分析发现, 高血压各组 E_{\max} 与对照组相比, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 说明左心室收缩末期 E_{\max} 与左心室舒张功能有相关性。分析造成 E_{\max} 与 E/A 相关性分别呈负相关的原因可能是: 心脏收缩心室容积减小, 内压增大, 在心室收缩末期血流仍然是原来血流量, 前负荷相对增加, 充盈缩小的左心室压力增加, 导致压力-容积关系线斜率改变。心脏左心室松弛开始于左室收缩后期, 左心室的舒张期与收缩期之间具有一个心肌僵硬度减低的过渡阶段。同时, 心肌细胞纤维化和顺应性降低是心衰早期的表现。上述结果说明收缩功能的变化影响舒张功能, 即 E_{\max} 增加及减低与左心室舒张功能障碍以及进一步心衰的发生有极其密切的关系。

4 结论

左心室收缩末期 maxEav、 E_{\max} 可以鉴别跨二尖瓣血流频谱的假性正常化。maxEav、 E_{\max} 是判断左室舒张功能更为敏感且简便易得的指标。同时, 分析高血压左室重构合并舒张功能异常患者 maxEav、 E_{\max} 的变化, 探索舒张性心衰的发病机制, 可以为今后预防及治疗舒张性心衰提供理论依据。

参考文献:

- [1] AZIZ F, LUQMAN-ARAFATH TK, ENWELUZO C, *et al.* Diastolic heart failure: A concise review [J]. J Clin Med Res, 2013, 5(5): 327-334.
- [2] 周鹏. 舒张性心力衰竭研究进展 [J]. 中西医结合心血管病杂志, 2015, 13(1): 20-22.
- [3] NAGUEH SF, SMISETH OA, APPLETON CP, *et al.* Recommendations for the evaluation of left ventricular diastolic function by echocardiography: An update from the American society of echocardiography and the European association of cardiovascular imaging [J]. Am Soc Echocardiogr, 2016, 29(4): 277-314.
- [4] KNEGT MC, BIERING-SØRENSEN T, SØGAARD P,

- et al.* Total average diastolic longitudinal displacement by colour tissue doppler imaging as an assessment of diastolic function [J]. *Cardiovasc Ultrasound*, 2016, doi: 10.1186/s12947-016-0083-2.
- [5] 陈维毅. 2016~2018 年我国生物力学研究进展 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(6): 477-482.
- CHEN WY. Advances in biomechanics in China during the year 2016-2018 [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(6): 477-482.
- [6] 司效东, 刘志跃, 娜日苏. 左室长短轴应力与左室收缩功能的偏相关分析 [J]. *中国美容医学*, 2012, 21(10): 51-52.
- [7] HARJOLA VP, MULLENS W, BANASZEWSKI M, *et al.* Organ dysfunction, injury and failure in acute heart failure: From pathophysiology to diagnosis and management. A review on behalf of the Acute Heart Failure Committee of the Heart Failure Association (HFA) of the European Society of Cardiology (ESC) [J]. *Eur J Heart Fail*, 2017, 19(7): 821-836.
- [8] 黄鹏辉, 黄榕喻. 用于心室辅助装置血流动力学性能评价的体外模拟循环系统技术进展 [J]. *医用生物力学*, 2018, 33(4): 365-371.
- HUANG PH, HUANG ZY. A review on mock circulatory systems for *in vitro* hemodynamic performance evaluation of ventricular assist devices [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(4): 365-371.
- [9] 崔洪岩, 黄冬梅. 超声二维应变评价无左心室重构高血压患者心肌分层应变 [J]. *中国超声医学杂志*, 2015, 31(8): 716-718.
- [10] 曾常亮, 游宇光. 实时三维超声心动图对多支冠脉病变患者左心室重构研究 [J]. *赣南医学院学报*, 2017, 37(6): 873-875.
- [11] VOORHEES AP, HAN HC. Biomechanics of cardiac function [J]. *Compr Physiol*, 2015, 5(4): 1623-1644.
- [12] 牛迪, 朱明新. 新一代左心室磁悬浮辅助泵血流动力学分析 [J]. *医用生物力学*, 2019, 34(5): 468-472.
- NIU D, ZHU MX. Hemodynamic analysis on meglev left ventricular assist device of a new generation [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(5): 468-472.
- [13] GENET M, LEE LC, NGUYEN R, *et al.* Distribution of normal human left ventricular myofiber stress at end diastole and end systole: A target for in silico design of heart failure treatments [J]. *Appl Physiol*, 2014, 117(2): 142-152.
- [14] STRAUER BE, BEER K, HEITLINGER K, *et al.* Left ventricular systolic wall stress as a primary determinant of myocardial oxygen consumption: Comparative studies in patients with normal left ventricular function, with pressure and volume overload and with coronary heart disease [J]. *Basic Res Cardiol*, 1977, 72(1): 306-313.
- (上接第 731 页)
- [6] 杜之渝, 吴宁玲, 张大勇, 等. 准分子激光原位角膜磨镶术后角膜基质床厚度安全值分析 [J]. *中华眼科杂志*, 2004, (11): 24-27.
- [7] 王卫群, 杨源芳. 准分子激光原位角膜磨镶术眼压的变化和术后青光眼的诊断 [J]. *中华眼外伤职业眼病杂志*, 2014, 36(7): 481-484.
- [8] 刘杰, 李朝峰, 马辉, 等. 准分子激光原位角膜磨镶术有限元分析 [J]. *中国机械工程*, 2008, 19(13): 1591-1595.
- [9] 杨艳芳, 陈定方, 曾衍钧, 等. 基于有限元法角膜组织力学变形仿真 [J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(1): 85-89.
- [10] 宋耀文, 贺瑞. LASIK 术后并发角膜扩张的研究进展 [J]. *山西医科大学学报*, 2017, 48(1): 81-85.
- [11] CHENG X, PETSCHKE SJ, PINSKY PM. A structural model for the *in vivo* human cornea including collagen-swelling interaction [J]. *J R Soc Interface*, 2015, doi: 10.1098/rsif.2015.0241.
- [12] FERNÁNDEZ DC, NIAZY AM, KURTZ RM, *et al.* Finite element analysis applied to cornea reshaping [J]. *J Biomed Opt*, 2005, doi: 10.1117/1.2136149.
- [13] SIMONINI I, PANDOLFI A. The influence of intraocular pressure and air jet pressure on corneal contactless tonometry tests [J]. *J Mech Behav Biomed*, 2016, doi: 10.1016/j.jmbbm.2015.07.030.
- [14] 张阳阳, 隋文婕, 宋鹏, 等. LASIK 术后继发圆锥角膜与原发圆锥角膜地形图特征比较 [J]. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2015, 17(1): 22-26.
- [15] 张科. Ex-PRESS 引流器植入术在难治性青光眼治疗中的临床研究 [D]. 重庆: 重庆医科大学, 2016.
- [16] DAWSON DG, GROSSNIKLAUS HE. Depth-dependent cohesive tensile strength in human donor corneas: Implications for refractive surgery [J]. *J Refract Surg*, 2008, 24(1): S85-89.
- [17] 吴芳芳, 贾洪强. Pentacam 测量 LASIK 术后角膜厚度与眼压分析 [J]. *中国实用眼科杂志*, 2015, 33(4): 421-423.