

文章编号: 1004-7220(2015)05-0468-06

基于脉搏波检测技术的心血管健康评测

宋晓瑞, 乔爱科

(北京工业大学 生命科学与生物工程学院, 北京 100124)

摘要: 脉搏波中蕴含丰富的生理病理信息,能反映心功能参数的早期变化趋势。因此,脉搏波信息的量化对心血管疾病具有重要的参考价值。从脉搏波的形成机制角度,阐述脉搏波与心血管生理病理信息的关系;从脉搏波的波形分析,阐述临床中应用脉搏波技术的心血管无创检测指标;将心血管的生理病理信息和脉搏波理论相结合,建立评测心功能健康状况的评价指标。基于脉搏波理论建立的心血管无创检测方法,有助于全面维护心血管健康,为心血管系统疾病的早发现、早预防、早治疗提供重要医疗手段;其次,可以简化临床检测过程,降低检测成本,实现心血管疾病适时地健康普检,降低心血管疾病的致死率和致残率。

关键词: 脉搏波; 心血管系统; 健康评测; 无创检测

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2015.05.468

Evaluation of cardiovascular health based on pulse wave detection technology

SONG Xiao-rui, QIAO Ai-ke (College of Life Science and Bio-engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: There contains so much physiological/pathological information in pulse wave, which can reflect the early changes in cardiovascular function parameters. Therefore, it would be valuable to quantify the information revealed by pulse wave as important reference for cardiovascular diseases. In this review, the relationship between physiological/pathological information in cardiovascular system and pulse wave was described from the viewpoint of pulse wave formation mechanism, and to explain how the non-invasive detection indexes supplied by pulse wave could be applied in clinical use by analyzing the waveforms. Cardiovascular health evaluation index established by physiological/pathological information from cardiovascular system with pulse wave theory was also discussed. The development of non-invasive detection methods for cardiovascular system based on pulse wave theory can contribute to cardiovascular health care and provide important reference for the early detection, early prevention and early treatment of cardiovascular diseases. Besides, the non-invasive detection method can simplify the process of clinical testing and reduce the costs so as to achieve health assessment on cardiovascular diseases timely and reduce the mortality and disability rates.

Key words: Pulse wave; Cardiovascular system; Health evaluation; Non-invasive detection

心血管疾病已成为威胁人类健康的重大公共卫生问题之一,被世界卫生组织列入21世纪危害人类的头号杀手^[1-3]。如果能在早期对心血管病变进行

及时干预,可有效控制心血管疾病的恶化,甚至使病情得到好转。有些心血管疾病处于中晚期时,血管重塑能力丧失,可能导致疾病不可逆转。因此,如何

收稿日期:2014-11-21; 修回日期:2015-01-05

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20111103110012)。

通信作者:乔爱科,教授, Tel:(010)67395567; E-mail:qak@bjut.edu.cn。

在早期检测到心血管疾病的存在十分关键。心功能参数是心血管疾病诊断的重要依据,脉搏波中蕴含了丰富的生理病理信息,在早期就能够反映出心功能参数的变化趋势^[4-6]。

本文从脉搏波的形成机制及波形分析方法角度出发,阐述脉搏波与心血管生理病理信息的关系,以及目前临床中应用脉搏波技术的心血管疾病的无创检测指标;并将心血管的生理病理信息和脉搏波理论相结合,建立评测心血管系统健康状况的评价指标。基于脉搏波理论建立的心血管无创评测方法的研究,有助于认识心血管系统生理病理的成因,全面维护心血管健康,加强心血管疾病的预防和诊断,促进治疗理论和新方法的革新,推动医疗设备的设计与研发、心血管疾病临床事业的发展,对心血管疾病的早期诊断具有重要的临床意义。

1 脉搏波的形成机制及传播

脉搏波是随着心脏的间歇性收缩和舒张,血流速度、血流量、血液压力以及血管壁的变形和振动在血管系统中向外周传播而形成的传播轨迹^[7]。因此,脉搏波中蕴含丰富的生理病理信息,记录脉搏波的形态、强度、速率及节律并提取其特征信息来评价心血管功能^[8],是心血管疾病与脉搏波工程交叉领域的前沿性课题之一。实验研究表明,脉搏波的传播速度随着动脉血管的弹性减小而增大,此外还受到血液黏度及外周组织对管壁的约束等影响,而这些因素与人体的生理病理因素密切相关,使得脉搏波传播规律的研究工作更具复杂性。

1.1 脉搏波的形成机制

心室收缩主动脉瓣打开,血液射入主动脉内,血液沿着动脉分支流向外周,由于血管系统有外周阻力,使射入主动脉的血液暂时留在主动脉近端,同时引起主动脉近心端的血管壁扩张和压力升高,可见血液的增量与血管壁的扩张程度有关。心室舒张时,心室停止射血,血管内的血流增量迅速减少,血压迅速减小,血管壁因弹性而继续回缩,此时主动脉瓣由于血液的反流推动而迅速关闭。由于血管壁的弹性回缩,反流的血液撞击在闭合的主动脉瓣上再一次流回血管,使得血管内的血压在下降后再一次升高,主动脉瓣关闭是心室收缩期与舒张期的分界点。心室规律性的舒张与收缩活动,使得整个动脉

系统中的血压升降和血管壁扩张与弹性回缩产生周期性的波动,即动脉系统中的脉搏,可称为动脉脉搏波。由此可见,脉搏波的形成机制十分复杂。

1.2 脉搏波的传播

在动脉脉搏波形成的同时,血管内的血压、血流量及血管壁扩张与弹性回缩等动脉系统中的物理量同样也会产生周期性的变化,这些变化会随着脉搏波的波动向血管的下游传播,直至传播到整个动脉系统,从而形成血压、流速、弹性等波动变化,这些存在于动脉系统中波动的传播过程称为动脉脉搏波的传播。柳兆荣等^[9-10]通过血液在心血管系统中的流动规律,特别对脉搏波在动脉管中传播规律的正确认识,为揭示脉搏波的形态、强度、速率与节律的科学本质提供帮助。

动脉脉搏波由前向波和反射波组成^[11-12]。由于心脏收缩,在主动脉近心端产生的波动称之为前向波,前向波在动脉系统传播过程中遇到动脉结构或顺应性等不匹配处形成反射波,尤其在小动脉、微动脉和毛细血管,是脉搏波反射的主要部位。在心脏收缩舒张期产生的前向波和反射波重叠融合形成了实际状态的脉搏波。区分脉搏波的前向波和反射波已经成为评价心脏负荷功能和临床用药的重要依据。Sugawara 等^[13]研究表明,在下肢动脉的波形中无明显反射点,随着血管老化,有效反射点可能会向外周动脉移动。Segers 等^[14]研究发现,当外周动脉血管发生阻塞时,有效反射点可能会向动脉近心端移动。Nichols 等^[11]研究表明,随着动脉弹性的下降,脉搏波速度增大,导致反射波与前向波汇合的时间减少,反射点越来越明显,且逐步向前向波靠近。

2 脉搏波与心血管生理病理信息的关系

从脉搏波的形成机制和传播特性可知,脉搏波与心血管系统中的力学参数变化密切相关,且脉搏波的波形中蕴含着大量的生理病理信息,是反映身体状况的重要信号。心血管在发生病变但是还未自觉症状时已出现心血管参数的变化,并首先反映在脉搏波的幅值与波形变化之中^[8]。柳兆荣等^[15]用数值方法求解主动脉和一根分枝动脉内的血液与管壁的耦合运动,并从得出的脉搏流动特征和脉象变化中,分析生理参数的已有变化和中医脉象的机制;此外,在线性化条件下,得出桡动脉压力波随生理参

数的变化,其结果与实验结果相当一致,且与中医临床论述一致^[16-17]。

脉搏波由升支和降支组成。升支代表心室收缩时动脉的突然扩张,迅速而平滑,心室快速射血,动脉血量增加及血压升高,上升的速度及波幅的大小受射血速度、动脉阻力和动脉壁弹性的影响^[18-19]。降支代表心室舒张,心室射血的后期,血压逐渐降低。下支的潮波是心室停止射血,动脉扩张,血压下降,动脉内逆向流动形成的反射波,主要与外周阻力、血管弹性及降支下降速度等变化有关。脉搏波中的幅值和波形变化,在一定程度上反映了高血压和动脉硬化等信息,该信息也可以将血压、血流、血管阻力及血管弹性等血流参数的变化表示出来。由此可见,波形图中的波形特征信息反映了心血管循环系统生理病理的疾病程度与发展趋势。

脉搏波的形态、强度、速率与节律等方面的综合是评价人体心血管系统生理病理状态的重要依据。波的形态可以辅助诊断二尖瓣病变、主动脉病变、房室间隔缺损。波形升支变缓,说明心室排血受阻,考虑主动脉瓣、血管等狭窄问题;波形高而陡,说明心室收缩期排血量代偿增加,考虑血液逆流问题,如主动脉瓣关闭不全。波的强度可以诊断生理性或病理性高动力状态和高血压^[20]。波的速率可以诊断动脉硬化,目前脉搏波的传导速度已经成为诊断动脉硬化的“金标准”。波的节律,如间歇性脉律异常可以诊断心脏病或者洋地黄中毒的病人。白净^[21]研究表明,人体出现心力衰竭、高血压等疾病时,脉搏波会呈现规律性的改变趋势,且运用血流动力学分布式仿真出了脉搏波随血液黏度和血管弹性的变化。

3 脉搏波的波形分析

脉搏波的波形特征信息与心血管的生理病理信息之间具有规律性和相关性,设计定量的测量方法及无创检测方法获取脉搏信号并分析所需信息,描述心血管系统中的脉搏波规律与特征,解释心血管系统的生理病理变化,成为脉搏波工程的首要任务^[22]。

脉搏波本身包含大量的信息,单纯的脉搏波信号的测量和分析并不能反映脉搏波本身的全部信息,故对波形的分析就显得愈加重要。从脉搏波波形变化中提取的生理病理信息研究波形特征与心血

管疾病之间的关系是目前评价心血管疾病的重要途径^[23-24]。国内外研究者一直在尝试用不同的分析方法分析脉搏波信息,研究波形特征与生理病理信息之间的关系。Melis等^[25]应用小波分析研究动脉压力波形特征,并评估健康中年人群的颈动脉压力波形,结果表明小波分析较动脉脉搏波分析方法更能提取颈动脉的波形特征,反映心血管的病理生理学特征。

波形的分析方法主要包括时域分析法和频域分析法。研究脉搏的科学方法是从频域上提取脉搏波的信号特征分析脉搏的频谱,因为在这些频谱中包含了与人体健康状况相对应的心血管生理病理信息,只是频谱分析的参数较为抽象,与实际临床上的意义相距较远,至今未取得较大进展。

4 心血管系统的临床无创检测指标

从脉搏波中获取人体的生理病理信息已成为临床诊断和治疗心血管疾病的重要手段,受到国内外学者的重视。心血管疾病的共同病理基础为动脉粥样硬化,对动脉粥样硬化的早干预、早治疗将减少心血管疾病事件的发生,在临床上针对动脉粥样硬化无创检测的不同技术有不同的评价指标。

(1) 脉搏波传导速度(pulse wave velocity, PWV):评价动脉硬化的经典指标,与心血管疾病具有很大的相关性,是心血管疾病的独立预测因子^[26-30]。脉搏波传导速度的测量是无创性的,操作简单,可重复,其计算公式为: $PWV = L/t$,其中 L 为记录部位之间的距离, t 为两个波形的传导时间差。医学常用指标有肱踝脉搏波传导速度(baPWV)和颈股动脉脉搏波传导速度(cfPWV),可以准确评价动脉的弹性功能,识别动脉管壁早期的病理特征,预测心血管事件。

(2) 心踝血管指数(cardio ankle vascular index, CAVI):PWV是血压波动的传导速度,在一定程度上受到血压的影响,由于该指标在医学上的重要性,基于PWV又不依赖于血压的血管功能的新评价指标——心踝血管指数^[31-33]问世。CAVI计算公式为: $CAVI = \ln(p_s/p_d) \cdot 2\rho/\Delta p \cdot PWV^2$,其中PWV为脉搏波速度, Δp 为脉压差, ρ 为血液密度。CAVI随着动脉壁硬化后其值变大,主要反映主动脉、股动脉和踝动脉的整体僵硬程度。

(3) 踝臂指数(ankle brachial index, ABI): 诊断下肢动脉粥样硬化引起的动脉狭窄或闭塞程度的指标,同时也是心脑血管事件和病死率的强有力预测因子^[34],已被推荐为预测成年人心血管事件的筛选指标^[35]。ABI的计算方法是踝动脉的最高压值除以上臂的最高压值。 $0.9 \leq \text{ABI} < 1$ 为临界值,当 $\text{ABI} < 0.9$ 时,提示下肢已有局部性动脉狭窄病变,随着ABI值的逐渐减小,狭窄程度逐渐严重。ABI在静息状态下可诊断下肢的闭塞程度,但是无法确定在运动状态下的供血情况,此时需要其他的辅助诊断和治疗。

(4) 趾肱指数(toe-brachial index, TBI): 诊断足关节和末梢动脉狭窄与闭塞,辅助ABI准确了解下肢末梢动脉的血管缺血性疾病。TBI的计算方法是用趾动脉的最高压值除以肱动脉的最高压值。趾压通常比踝动脉的血压低3.99 kPa(30 mmHg),正常情况下 $\text{TBI} < 0.7$ 。一般 $\text{ABI} > 1.4$ 时通常认为血管钙化^[36],需要TBI的辅助诊断,但TBI不适合下肢持续性缺血疾病的诊断标准,只能作排除标准。

(5) 颈动脉内中膜厚度(intima-media thickness, IMT): 预测全身动脉粥样硬化的指标^[37],颈动脉内中膜是病变最早的受累位置^[38],故血管壁内膜增厚是反映动脉粥样硬化早期标志。临床上, $\text{IMT} < 1.0 \text{ mm}$ 为正常, $1.0 \text{ mm} < \text{IMT} < 1.2 \text{ mm}$ 为内膜增厚, $1.2 \text{ mm} < \text{IMT} < 1.4 \text{ mm}$ 为斑块形成, $\text{IMT} > 1.4 \text{ mm}$ 为颈动脉狭窄。多项流行病学研究发现,IMT临床诊断结果与病理学检查具有很好的相关性,其中 $\text{IMT} > 1.0 \text{ mm}$ 是缺血性脑血管疾病的独立预测因子。

5 基于脉搏波理论的心血管功能评价指标体系的建立

基于脉搏波评估心功能指标的方法是目前无创检测技术的主要手段,该方法主要通过识别脉搏波波形的特征信息,结合相关的生理与病理信息,推导出反映心功能状态的评估指标。心功能评估指标是反映健康水平及运动能力的核心内容,可以预测未来发生心血管疾病的风险。本文从心功能参数的无创检测角度出发,设计了与心功能密切相关的四类

参数:血流动力学参数、血液流变参数、血管参数和心脏做功参数。

血流动力学参数有血压、心率、血流量、心输出量、心搏输出量、心脏指数、心搏指数等参数。其中血压和心率是直接测量指标,其他参数为直接测量指标的派生指标。血流动力学参数的派生指标主要研究血流量和血压以及它们之间的相互关系。推导血流动力学参数时,需要推算血流量的估计值。血流量随时间变化的曲线以血压梯度值进行推算,故最终问题转换为血流量和血压之间的关系,从而进行心功能参数的估计和推算。

血液流变参数有平均血流切变率、峰值血流切变率和血液黏度等参数,主要研究血管的流变性、血液的流动性、黏滞性和变形性及血液的有形成分,反映血管和血流在疾病时的变化。血液流变性很大程度上取决于切变率或平均切变率。已有研究表明,血液黏度在低切变率下增高,可作为心血管事件的预测因子。低切变率下的血液黏度比高切变率下的血液黏度更能预测心血管事件的危险性。

血管参数有外周阻力和动脉顺应性等参数,主要度量动脉腔弹性、动脉壁硬度和动脉弹性的特性,反映动脉在舒张功能下的状态。动脉硬度的无创检测方法通过脉搏波速度和反射波增强指数来判定。动脉的弹性又称顺应性,大、小动脉弹性指数是反映大、小动脉的弹性功能的指标,其信号来自桡动脉压力波形,反映了整个系统动脉内压力与容积的关系即动脉顺应性或弹性。弹性指数能较敏感地早期发现动脉弹性功能减退,其值越小表示大、小动脉弹性越差^[39]。

心脏做功参数有舒张/收缩末左心室容积、射血分数、心脏平均功率、每搏心功等参数,能全面评价心脏泵血功能。其中,舒张/收缩末左心室容积参数是反映体心室肌收缩能力的特异指标,对评估心脏收缩状态有着重要的意义。但该参数因导管法的创伤性及昂贵的价格,临床很难开展。如何用无创评测方法并准确地表达心肌力学参数是急需解决的实际问题。目前,在医学研究中用流行病学的统计方法来拟合该指标与临床无创检测方法的参数关系式,成为临床诊断的可靠方法。

6 结论

脉搏波中蕴含丰富的生理病理信息,从波形信息中提取相关参数,模拟心功能的生理信息和力学形态,将复杂的心功能信息量化,从而得到评价心功能的无创检测方法。深入了解脉搏波的波形信息,揭示和定量描述心血管的力学形态和病变的产生和发展情况,将为构建心功能无创评测参数提供理论支持。

目前,基于脉搏波的心功能检测模型、方法和仪器已取得很大进展,但仍存在以下问题:①评价参数单一化,如波形系数主要考虑脉搏波的积分特性而忽略其微分特征;②对脉搏波传播进行了较多简化,如采用线性化模型而不是非线性模型,或对参数进行了较多的假设和猜测;③脉搏波信号的不稳定性和非线性给其发展带来困难和阻力;④国外产品技术壁垒、无法了解其核心理论模型和算法,或仪器不适于中国人群特征;⑤临床上心功能的诊断复杂且价格昂贵,医生主要依据临床测量和经验评价疾病或手术的优劣,并没有公认完善的体系标准。因此,明确心脏的力学参数、波形信息及生理指标之间的定量关系,是脉搏波应用于心功能无创检测的关键,只有将理论和临床学者的研究结合,才能实现脉搏波在心功能中的应用和发展,减少临床评价标准与理论标准之间的差距。

如何根据脉搏波信息建立评价心功能的评价体系需要完善以下工作:①根据心脏和血管自身的本构关系,建立心血管参数的静态和动态本构方程,是实现心血管量化和参数化的关键;②研究波形信息与心功能的生理病理信息的对照关系,寻求波形与疾病之间的变化关系,探讨如何根据波形来诊断心血管疾病;③建立四肢脉搏波的非线性数学模型,研究脉搏波在整个人体系统中的传播特性,全面了解脉搏波与人体系统的关系,解决无创诊断和治疗机制;④根据已有的临床评价标准、传统的中医脉象理论及脉搏波理论,建立更为科学的心功能评价标准,并开发研制无创检测仪器和临床专家系统,为心血管的无创检测提供更为快捷方便适合健康普检的科学标准和仪器。

参考文献:

- [1] World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs): Fact sheet No. 317 [R]. Geneva: WHO, 2015.
- [2] He J, Gu D, Wu X, *et al.* Major causes of death among men and women in China [J]. *N Engl J Med*, 2005, 353(11): 1124-1134.
- [3] Lopez AD, Mathers CD, Ezzati M, *et al.* Global and regional burden of disease and risk factors, 2001: Systematic analysis of population health data [J]. *The Lancet*, 2006, 367(9524): 1747-1757.
- [4] 杨菊贤, 杨志寅, 胡大一. 行为心脏病学[J]. *中国行为医学科学*, 2007, 16(9): 773-775.
- [5] Franklin SS, Khan SA, Wong ND, *et al.* Is pulse pressure useful in predicting risk for coronary heart disease. The Framingham Heart Study [J]. *Circulation*, 1999, 100(4): 354-360.
- [6] Takenaka T, Kobayashi K, Suzuki H. Pulse wave velocity as an indicator of arteriosclerosis in hemodialysis patients [J]. *Atherosclerosis*, 2004, 176(2): 405-409.
- [7] 张永亮. 基于桡动脉波形分析的心血管功能评估方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学博士学位论文, 2012.
- [8] O'Rourke MF. Time domain analysis of the arterial pulse in clinical medicine [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2009, 47(2): 119-129.
- [9] 柳兆荣. 脉象的数学描述[J]. *湖南中医杂志*, 1985, 1: 21-25.
- [10] 柳兆荣. 中医脉象与血液动力学[J]. *自然杂志*, 1982, 5(6): 411-414.
- [11] Nichols WW, O'Rourke MF. McDonald's blood flow in arteries: Theoretical, experimental and clinical principles [M]. USA: CRC Press, 2011.
- [12] Swamy G, Olivier NB, Mukkamala R. Calculation of forward and backward arterial waves by analysis of two pressure waveforms [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2010, 57(12): 2833-2839.
- [13] Sugawara J, Hayashi K, Tanaka H. Distal shift of arterial pressure wave reflection sites with aging [J]. *Hypertension*, 2010, 56(5): 920-925.
- [14] Segers P, Rietzschel R, De Buyzere ML, *et al.* Assessment of pressure wave reflection: Getting the timing right [J]. *Physiol Meas*, 2007, 28(9): 1045.
- [15] 陶明德, 柳兆荣. 分枝动脉脉搏流的数值模拟[J]. *力学季刊*, 1981, 4: 56-62.
- [16] 柳兆荣, 李惜惜. 关于脉图的分析[J]. *中国科学: B辑*, 1983, 2: 131-138.
- [17] 柳兆荣, 李惜惜. 桡动脉压力波随生理参数的变化[J]. *力学学报*, 1982, 18(3): 244-250.
- [18] Qiu Y, Tarbell JM. Interaction between wall shear stress and circumferential strain affects endothelial cell biochemical production [J]. *J Vasc Res*, 2008, 37(3): 147-157.
- [19] Liang FY, Takagi S, Himeno R, *et al.* Biomechanical

- characterization of ventricular-arterial coupling during aging: Multi-scale model study [J]. *J Biomech*, 2009, 42(6): 692-704.
- [20] Takenaka T, Kobayashi K, Suzuki H. Pulse wave velocity as an indicator of arteriosclerosis in hemodialysis patients [J]. *Atherosclerosis*, 2004, 176(2): 405-409.
- [21] 白净. 桡动脉脉搏波的仿真模型[J]. *航天医学与医学工程*, 1995, 8(2): 94-98
- [22] Oliver JJ, Webb DJ. Noninvasive assessment of arterial stiffness and risk of atherosclerotic events [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2003, 23(4): 554-566.
- [23] 康甲顺. 心脏搏血的生物力学和心电变化[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(4): 470-474.
- Kang JS. Biomechanics of cardiac blood pumping and electrical changes of the heart [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(4): 470-474.
- [24] 郭维, 刘光达, 焦阳, 等. 基于脉搏波信号和血管弹性腔模型的动脉血压连续测量方法[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 84-89.
- Guo W, Liu GD, Jiao Y, *et al.* Continuous measurement of arterial blood pressure based on pulse wave signal and vessel elastic chamber model [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 84-89.
- [25] De Melis M, Morbiducci U, Rietzschel ER, *et al.* Blood pressure waveform analysis by means of wavelet transform [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2009, 47(2): 165-173.
- [26] Choi JC, Lee JS, Kang SY, *et al.* Limitation of brachial-ankle pulse wave velocity in assessing the risk of stroke: Importance of instantaneous blood pressure [J]. *Cerebrovasc Dis*, 2009, 27(5): 417-425.
- [27] Kim HJ, Nam JS, Park JS, *et al.* Usefulness of brachial-ankle pulse wave velocity as a predictive marker of multiple coronary artery occlusive disease in Korean type 2 diabetes patients [J]. *Diabetes Res Clin Pr*, 2009, 85(1): 30-34.
- [28] Seo WW, Chang HJ, Cho IS, *et al.* The value of brachial-ankle pulse wave velocity as a predictor of coronary artery disease in high-risk patients [J]. *Korean Circ J*, 2010, 40(5): 224-229.
- [29] Alvim RD, Santos PC, Dias RG, *et al.* Association between the C242T polymorphism in the p22phox gene with arterial stiffness in the Brazilian population [J]. *Physiol Genomics*, 2012, 44(10): 587-592.
- [30] Rezai MR, Wallace AM, Sattar N, *et al.* Ethnic differences in aortic pulse wave velocity occur in the descending aorta and may be related to vitamin D [J]. *Hypertension*, 2011, 58(2): 247-253.
- [31] Shirai K, Song M, Suzuki J, *et al.* Contradictory effects of β 1- and α 1- adrenergic receptor blockers on cardio-ankle vascular stiffness index (CAVI)-CAVI independent of blood pressure [J]. *J Atheroscler Thromb*, 2010, 18(1): 49-55.
- [32] Takaki A, Ogawa H, Wakeyama T, *et al.* Cardio-ankle vascular index is superior to brachial-ankle pulse wave velocity as an index of arterial stiffness [J]. *Hypertens Res*, 2008, 31(7): 1347-1355.
- [33] Yambe T, Meng X, Hou X, *et al.* Cardio-ankle vascular index (CAVI) for the monitoring of the atherosclerosis after heart transplantation [J]. *Biomed Pharmacother*, 2005, 59(Suppl 1): S177-S179.
- [34] 杨士伟, 胡大一. 踝臂指数对冠状动脉狭窄重程度的预测价值[J]. *中国医药导刊*, 2006, 8(2): 79-82.
- [35] Wyman R A, Keevil JG, Busse KL, *et al.* Is the ankle-brachial index a useful screening test for subclinical atherosclerosis in asymptomatic, middle-aged adults [J]. *WMJ*, 2006, 105(6): 50-54.
- [36] Hirsch AT, Haskal ZJ, Hertzner NR, *et al.* ACC/AHA guidelines for the management of patients with peripheral arterial disease (lower extremity, renal, mesenteric, and abdominal aortic) [J]. *J Vasc Interv Radio*, 2006, 17(9): 1383-1398.
- [37] Prati P, Toso A, Vanuzzo D, *et al.* Carotid intima media thickness and plaques can predict the occurrence of ischemic cerebrovascular events [J]. *Stroke*, 2008, 39(9): 2470-2476.
- [38] Ghiadoni L, Salvetti M, Muesan ML, *et al.* Evaluation of endothelial function by flow mediated dilation: Methodological issues and clinical importance [J]. *High Blood Press Cardiovas Prev*, 2015, 22(1): 17-22.
- [39] Millasseau SC, Patel SJ, Redwood SR, *et al.* Pressure wave reflection assessed from the peripheral pulse is a transfer function necessary [J]. *Hypertension*, 2003, 41(5): 1016-1020.