

脉搏波传导速度评价动脉粥样硬化性疾病的应用进展

李悦, 夏俊, 张敏, 徐朝阳

(南京医科大学附属江苏盛泽医院内分泌科, 江苏省苏州市 215228)

[关键词] 脉搏波传导速度; 动脉粥样硬化; 心脑血管疾病

[摘要] 动脉粥样硬化是导致各种心脑血管事件的主要因素,也是糖尿病、高血压、高脂血症等慢性疾病最主要的致病机制,早诊断早治疗是延缓及控制动脉粥样硬化性疾病的重要措施。脉搏波传导速度作为一种有效评估动脉粥样硬化的手段,因其无创、经济、操作简单等优点,近年在临床使用广泛。该文主要从脉搏波传导速度测定原理及应用两大方面作一综述。

[中图分类号] R54

[文献标识码] A

Progress on application of pulse wave velocity in evaluation of atherosclerotic diseases

LI Yue, XIA Jun, ZHANG Min, XU Chaoyang

(Department of Endocrinology, the Affiliated Jiangsu Shengze Hospital of Nanjing Medical University, Suzhou, Jiangsu 215228, China)

[KEY WORDS] pulse wave velocity; atherosclerosis; cardio-cerebrovascular disease

[ABSTRACT] Atherosclerosis is the main factor leading to various cardio-cerebrovascular events, and it is also the main pathogenic mechanism of chronic diseases such as diabetes, hypertension and hyperlipidemia. Early diagnosis and early treatment are important measures to delay and control atherosclerosis. Pulse wave velocity, as an effective method to evaluate atherosclerosis, has been widely used in clinic because of its advantages of noninvasive, economical and simple operation. In this paper, the measurement principle and application of pulse wave velocity are reviewed.

动脉粥样硬化(atherosclerosis, As)病变范围可累及体循环系统各大小动脉,使受累动脉弹性减弱、脆性增加、管腔变窄,严重者甚至完全闭塞,是导致各种急慢性心脑血管事件的主要原因。As 经过积极治疗后较早期的病变可部分消退,因此早期诊断 As 至关重要。由于 As 病变是一个缓慢进展的过程,早在出现临床症状之前,已经出现动脉弹性减弱、顺应性减退等病理变化,脉搏波传导速度(pulse wave velocity, PWV)正是在此原理上检测 As 早期病变的一种方法,由于其无创、便捷、经济等优点获得广泛应用。本文将从 PWV 测定原理及应用进展方面作一综述。

1 脉搏波传导速度的测定原理

脉搏波是心脏周期性射血使血管产生的波动,

随着心脏射血从主动脉根部起始,沿着动脉树向周身传播,PWV 正是基于此原理,通过检测两个部位传感器之间的距离(ΔL)及一次心动周期所产生的脉搏波波形时间差(Δt)而获得脉搏波传导速度^[1](图1)。其计算公式为 $PWV(\text{cm/s}) = \text{两定点间距离}(\Delta L) / \text{压力波通过两定点间距离的时间差}(\Delta t)$ 。动脉除了具有为血液提供到达周围组织的导管作用外,在血液循环中还发挥了缓冲作用,以保证在心脏不射血时体内血液循环的持续状态及每个心动周期血压的平稳。在循环系统中各节段动脉的导管及缓冲特性是不同的,一般情况下近端动脉弹性更大,起到的缓冲作用较大,远端动脉弹性较小,缓冲功能会逐渐丧失,而导管功能占主导地位,这种异质性是由动脉壁的成分、细胞和组织学结构等因素引起的^[2]。1878年,Moens 等通过研

[收稿日期] 2020-03-24

[修回日期] 2020-10-20

[基金项目] 南京医科大学康达学院科研发展基金(KD2018KYJJYB057);江苏盛泽医院院级科研项目(SYK202003)

[作者简介] 李悦,硕士,住院医师,研究方向为内分泌与代谢病,E-mail 为 547738164@qq.com。通信作者徐朝阳,主任医师,副教授,研究方向为内分泌与代谢病,E-mail 为 doctorxycy@126.com。

究得出脉搏波传导速度公式为: $PWV = K \sqrt{\frac{Eh}{\rho D}}$, 其中 K 是 Moens 常数, 对人体而言常取值 0.8, E 是指管壁的弹性系数, h 是血管壁厚度, ρ 是流体密度, D 是平衡状态下血管内径。由此可见影响 PWV 的主要因素为血管的几何特性(管壁厚度与腔径大小)、生物力学特性(弹性)和血液密度, 由于血管几何特性及血液密度变化相对小, 因此动脉弹性是影响 PWV 大小的主要因素, 动脉弹性越差, 顺应性越低, PWV 越大。由于 As 主要累及体循环内大中动脉, 以血管内膜形成粥样瘤或粥样斑块为特征, 逐渐致动脉管壁结构破坏, 管壁僵硬, 管腔弹性减退, 大中动脉在循环系统中承担主要的缓冲作用, 该作用被削弱后, 两点之间血液流速加快, PWV 随之增加。

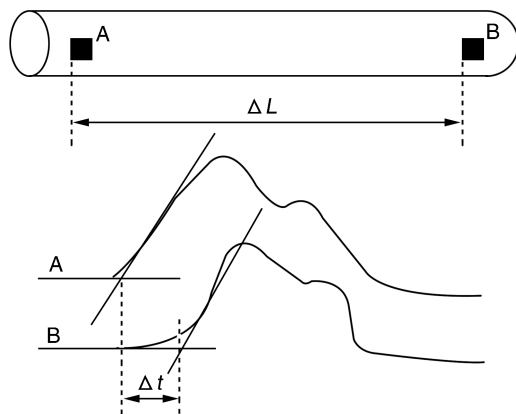


图 1. PWV 检测原理

A、B 分别为两个部位传感器; ΔL 为两个部位传感器之间距离; Δt 为两个部位传感器接受脉搏波波形时间差。

Figure 1. Principle of PWV detection

目前临床及科研上应用的 PWV 检测系统主要有光电传感、压敏传感及超声多普勒检测系统。其中, 光电传感检测系统是通过光敏器件感受血流反射或投射光的强弱变化信号, 记录微小动脉中血流量的变化情况^[3], 该系统使用较为便捷, 但因光线反射及投射能力有限, 不适宜肌肉较厚的组织, 因此常用于手指、脚趾等末梢循环部位, 准确性一般。基于压敏传感的检测系统是目前临床及科研应用最为广泛的 PWV 检测系统, 它通过压力敏感的探头检测体表压力波, 从而采集脉搏波信号, 具有操作便捷、仪器成本较低等优势, 但因其是利用置于体表的传感器来采集脉搏信号, 因此该方法仅限于测量体表可触及动脉^[4]。超声多普勒检测系统是基于超声波的脉搏信号采集系统, 由超声波探头通

过压电晶片发射及接收超声波, 来感受超声波在动脉血管中遇到血流产生的多普勒效应, 产生反射波和频移, 再由压电晶片接受反射波信号转变为脉搏波信号^[5]。血管回声跟踪(echo tracking, ET)技术是近年来较为受关注的一项检测 PWV 的超声诊断技术, 它通过超声波探头同时采集射频信号的时相信息, 将相邻两次射频信号时相信息转化为距离信息, 以此来描记血管壁运动曲线^[6]; 该测量方法精确度高, 能早期发现动脉硬化改变, 但也存在着操作时间长、仪器昂贵等缺点。超声极速成像技术(ultrafast imaging, UFI)是近年兴起的一项新技术^[7], 通过获得血管壁收缩起始和结束时的 PWV 来评价血管管壁扩张性和僵硬性, 由于采集帧频快, 具有较快的采集和处理数据速度, 测量 PWV 更加简便、快速、准确, 但目前临床工作中尚未普及, 多见于科研。

根据感受器测量部位的不同, PWV 检测项目分为以下几种: 臂-踝动脉 PWV (brachial-ankle PWV, baPWV)、颈-股动脉 PWV (carotid-femoral PWV, cfPWV)、颈-踝动脉 PWV (carotid-ankle PWV, caPWV) 等, 临床以 cfPWV 和 baPWV 常用。cfPWV 作为评估动脉硬化的“金指标”, 可直接反映中心动脉僵硬性, 自 2007 年起已被欧洲高血压防治指南推荐用于评估高血压患者动脉硬化程度, 能准确的预测心血管事件发生风险。baPWV 同样可反映动脉硬化程度, 其与 cfPWV 有着较高相关性, 测量方法简便, 在操作时只需将袖带放置于被检者双上肢肱动脉、双下肢胫后动脉波动最明显处, 无需暴露腹股沟, 被检者配合度高, 对检查者技术要求低, 可重复性良好, 但由于各节段动脉弹性存在差异, 且其感受器间距离较远, 测量结果更容易受到各种动脉分叉、小动脉反射波及压力放大作用的影响, 在评估 As 价值方面存在一定局限性^[8]。

2 脉搏波传导速度的应用

2.1 检测动脉粥样硬化早期病变

As 是一个缓慢进展的体循环病变, 受累动脉从出现管壁增厚、僵硬、弹性减弱、脆性增加起, 逐渐发展为管腔狭窄、闭塞, 甚至继发引起斑块内出血、斑块破溃、脱落形成栓子, 引起全身各系统疾病。在其病变早期干预, 不仅能延缓其进展, 部分病变甚至可以消退。因此早期进行 As 筛查至关重要, 尤其对于高龄、吸烟、高脂血症、高血压、糖尿病等高风险人群。

周围血管病变是糖尿病患者主要的并发症之一,其所致的心脑血管疾病极大的影响了糖尿病患者的生活质量与生存率。糖尿病周围血管病变的主要致病机制即 As,其中氧化应激水平增高、晚期糖基化终末产物形成、蛋白激酶激活等均可能参与高血糖致 As 过程。有研究^[9]表明,早在糖尿病前期,患者的动脉僵硬度已有所升高。有学者^[10]发现糖尿病前期患者的 baPWV 明显高于健康对照组,认为 baPWV 可用于糖尿病患者早期并发症的评估。另有相关研究^[11]结果表明,动脉僵硬度与早期糖尿病肾病有关,通过 PWV 的检测可发现尚未有临床表现的早期糖尿病肾病患者群体,并予以早期干预。

高血压人群同样为 As 高风险人群。在 2007 年欧洲高血压防治指南中已将 PWV 列为检测动脉硬化的有效手段。有临床研究^[12]显示,在初发高血压人群中,尽管颈动脉超声未发现 As 等表现,但其双侧 PWV 均已显著高于健康对照组。王铖等^[13]研究发现 baPWV 可作为诊断中青年原发性高血压患者早期肾损害的敏感指标。

为研究 As 早期血管壁功能和形态变化,Gotschy 等^[14]的一项动物研究发现 As 模型小鼠的 PWV 增高较动脉壁厚度显著增加提前 12 周出现,提示在 As 的病变过程中 PWV 的变化早于动脉管壁形态学改变。以上研究均表明 PWV 对 As 具有早期检测作用。

2.2 预测动脉粥样硬化性疾病的发生

高血压、糖尿病、血脂异常等是心脑血管疾病发生的重要危险因素,但有许多致命性的心脑血管事件在发生之前并无先兆症状及上述危险因素预警。因此,在普通人群中检测亚临床的 As,以识别将来发生的心脑血管疾病高风险人群同样重要。许多研究结果提示 PWV 在预测动脉粥样硬化性疾病发生方面发挥着重要作用。有前瞻性研究^[15]结果显示,PWV 可预测高血压的进展,并且是预测年轻人高血压发生的良好指标。一项对 2 835 名健康受试者随访 4 年的研究^[16]结果表明,cfPWV 是冠心病和脑卒中的独立预测因子。Francesco 等^[17]的研究纳入了 1 678 名健康受试者,通过 9 年的随访也得出了类似结果。一项荟萃研究^[18]系统性分析了 19 项相关研究,结果显示 cfPWV 每升高 1 m/s,未来心血管事件的发生风险即增加 1.12 倍。一项共纳入了 14 673 例研究对象的荟萃分析^[19]显示,baPWV 可增强评价心血管危险因素的 Framingham 风险评分预测心血管疾病发生风险的功效。

除了普通人群中 PWV 可帮助预测动脉粥样硬化性疾病的发生,研究显示在 As 高风险人群中,PWV 在预测未来心脑血管事件发生方面也发挥着重要作用。Pereira 等^[20]的一项纳入 1 133 例高血压患者的前瞻性研究发现,PWV 增加的高血压患者卒中累积发生率显著高于 PWV 正常患者,结果提示 PWV 是高血压患者发生脑卒中的独立预测因子。一项针对无临床冠心病症状的 2 型糖尿病患者的研究^[21]表明,在排除其他干扰因素后,baPWV 与冠状动脉钙化积分呈正相关。总之,PWV 预测动脉粥样硬化性疾病发生的作用得到了临床及学术界的普遍认可。

2.3 评估动脉粥样硬化性疾病严重程度及死亡风险

除了对 As 早期病变的检测作用之外,PWV 在动脉粥样硬化性疾病的严重程度判断方面也具有一定价值。有研究^[22-23]结果显示,在接受冠状动脉造影的冠心病患者中,冠状动脉病变的严重程度与 cfPWV 之间存在很强的相关性。Kim 等^[24]纳入了 501 例稳定型心绞痛患者,通过行冠状动脉造影检查后发现,baPWV 与冠状动脉病变的严重程度显著相关。Chung 等^[25]研究结果显示在 703 例接受冠状动脉造影的患者中,baPWV 和冠状动脉病变 SYNTAX 评分呈正相关,提示 PWV 与冠心病严重程度显著相关。一项对 1 124 名接受一般健康检查的受试者随访 2.7 年的研究^[26]发现,较高的 baPWV 与冠状动脉钙化进展呈显著正相关。但是也有学者持不同观点,国内有研究^[27]通过比较正常组与各级冠状动脉病变组间 baPWV,结果显示各组间 baPWV 无统计学差异,且各组间 baPWV 与反应冠状动脉造影病变的 Gensini 评分无明显相关,故认为 baPWV 对冠心病及病变程度无评估价值。韩国有研究^[28]结果显示有冠状动脉病变组 baPWV 较无明显冠状动脉病变组显著升高,但在冠状动脉病变严重程度不同的各组间无显著差异,因此认为 baPWV 虽然是预测冠心病的良好指标,但对于判断冠心病严重程度价值有限。Chiha 等^[29]的研究也得出了类似结果。

PWV 除了用于动脉粥样硬化性疾病严重程度的评估,也有学者将其应用于相关疾病死亡风险的预测。一项纳入 2 795 例受试者的研究^[30]结果显示,PWV 是肾功能受损人群慢性肾脏病进展和死亡的重要预测指标,提示 PWV 测量可能有助于更好的确定慢性肾脏病患者的预后,以便对此类病人进

行早期的 As 干预。Sarafidis 等^[31]对接受血液透析病人进行了一项前瞻性研究,随访 28 个月,结果显示 PWV 是唯一与死亡风险独立相关的血管参数。类似的还有 Sarafidis 等^[32]的研究,结果显示接受血液透析的患者 PWV 检测对心血管疾病方面的预后和死亡风险具有重要的预测意义。也有相关大型纵向研究^[33]结果显示,在校正混杂因素后,PWV 是慢性阻塞性肺病患者心血管死亡风险的独立预测因子。另一项纳入了 1 557 例急性脑卒中患者的随访研究^[34]结果表明,更高的 baPWV 值有助于预估急性脑梗死患者死亡风险。

2.4 作为研究影响动脉粥样硬化进展因素的重要参考指标

在 As 病程中通过对危险因素的监测,使病情得到控制是动脉粥样硬化性疾病防治中的关键环节。许多研究将 PWV 作为评估 As 病变进展的有效指标,以研究影响 As 发生发展的因素。国内有学者^[35]通过研究发现累积尿酸暴露是 baPWV 升高的危险因素,结果提示累积尿酸暴露可能加速 As 的发展。Karpettas 等^[36]以 PWV 作为参考指标,研究结果发现动态血压尤其是夜间收缩压对 As 影响较大。有前瞻性研究^[37]纳入了 5 342 例研究对象,随访 5 年,以 cfPWV 作为动脉僵硬度的参考指标,认为肺功能降低是促进 As 进展的危险因素。一项针对混合型结缔组织病的研究^[38]将 cfPWV 用作评估 As 的指标,结果发现与对照组相比患病人群组的 cfPWV 更高,因此存在着更高的心血管疾病风险,除了疾病本身,年龄和血压也是该类患病人群中 As 的主要影响因素。Poon 等^[39]的研究纳入了 2 477 例非糖尿病患者作为研究对象,以 cfPWV 评价中央动脉僵硬度,结果显示代表胰岛素抵抗程度的新标记甘油三酯/高密度脂蛋白比值与 cfPWV 呈正相关,因此认为在非糖尿病人群中,胰岛素抵抗与中央动脉僵硬度呈正相关。一项纳入 3 888 例受试者的研究^[40]中,以 baPWV 为观察指标,发现在女性中高血压与包括 PWV 在内的所有 As 参数均有关,因此需对高血压进行干预以期阻止 As 的进展。国内王来明等^[41]纳入 6 143 例研究对象,以 baPWV 作为动脉硬化参考指标,研究结果表明体质质量指数在高水平保持稳定增长者更易发生动脉硬化。

因此研究中将 PWV 作为评价 As 病变进展的指标,有助于对可能影响 As 进展的利害因素进行识别,以指导临床诊疗。也有部分研究者以 PWV 为参照,验证一些生活方式或指标对 As 的影响,为预防动脉粥样硬化性疾病发生发展提供新靶点。

Syed-Abdul 等^[42]研究结果显示,低碳水化合物饮食 4 周可显著改善 PWV,并且女性比男性效果明显,因此饮食控制可改善女性 As。

2.5 评估动脉粥样硬化性疾病治疗效果

动脉粥样硬化性疾病的治疗是一个漫长的过程,需有更便捷有效的指标来辅助评估疗效以选择最佳治疗方案。一项 Meta 分析^[43]表明,降压药物在降压之外有着改善 PWV 的作用,并且在随访期间 PWV 仍有着显著改善,其中血管紧张素转换酶抑制剂较其他降压药物降低 PWV 更为明显。一项双盲研究^[44]显示,在经过 8 周的治疗后,坎地沙坦与氨氯地平对高血压患者的 PWV 无明显影响。另外有研究^[45]通过比较治疗前后糖尿病患者 PWV,结果显示降糖药物可明显减轻糖尿病患者动脉硬化。de Boer 等^[46]通过双盲随机研究得出,在治疗 26 周后,与安慰剂相比,利格列汀可降低早期 2 型糖尿病患者的主动脉 PWV,提示利格列汀对改善动脉硬化具有良好作用。他汀类药物在心脑血管疾病中的防治作用已得到医学界较多肯定,国内外有研究在冠心病、高血压、糖尿病人群中以 PWV 为判断动脉硬化程度的指标,进一步证实了他汀类药物对 As 的改善作用;有 Meta 分析^[47]通过总结关于各种他汀类药物对 PWV 改善作用的相关研究,综合评价分析后,显示他汀类药物对于改善动脉硬化具有良好疗效。

3 总 结

As 是导致各种心脑血管事件的主要因素,也是糖尿病、高血压、高脂血症等慢性疾病最主要的致病机制,由于其受累人群广泛,危害极大,且发展到一定程度很难逆转,因此需要一定的筛查手段发现早期病变以便及时干预。PWV 因其无创、经济、操作简单、可重复性良好等优点,近年来逐渐成为有效评估 As 的常用手段。当然,PWV 由于不进行血管成像,必须从体表估测血管长度,而忽略了动脉的立体形态与曲折性,检测结果可能存在一定误差,但随着技术的不断完善,PWV 的准确性也在逐步提高。总之,PWV 是一项评估 As 病变的良好检测手段,能指导临床更好的进行病变识别及早期干预。

[参考文献]

- [1] Palmiero P, Maiello M. A quick, easy, unexpensive method to assess pulse wave velocity by echocardiography: an early

- marker of subclinical atherosclerosis: a review[J]. *Cardiol Cases Syst Rev*, 2019, 1(1): 6-9.
- [2] Laurent S, Cockcroft J, Bortel LV, et al. Expert consensus document on arterial stiffness: Methodological issues and clinical applications[J]. *Eur Heart J*, 2006, 27(21): 2588-2605.
- [3] Perpetuini D, Chiarelli AM, Maddiona L, et al. Multi-site photoplethysmographic and electrocardiographic system for arterial stiffness and cardiovascular status assessment[J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 156-168.
- [4] Pereira T, Correia C, Cardoso J. Novel methods for pulse wave velocity measurement[J]. *J Med Biol Eng*, 2015, 35(5): 555-565.
- [5] Wang Z, Fu Z, Yang Y, et al. A novel methodology for rat aortic pulse wave velocity assessment by doppler ultrasound: validation against invasive measurements[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2019, 317(6): H1376-H1387.
- [6] Collette M, Palombo C, Morizzo C, et al. Carotid-femoral pulse wave velocity assessed by ultrasound: a study with echotracking technology[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2017, 43(6): 1187-1194.
- [7] Zhang L, Fang L, Zhang D, et al. Ultrasound ultrafast imaging of the carotid artery pulse wave velocity: is the surrogate of regional artery stiffness? [J]. *Circulation*, 2019, 140(Suppl 1): 115.
- [8] Cavalcante JL, Lima JAC, Redheuil A, et al. Aortic stiffness: current understanding and future directions[J]. *J Am Coll Cardio*, 2011, 57(14): 1511-1522.
- [9] Brannick B, Wynn A, Dagogo-Jack S. Prediabetes as a toxic environment for the initiation of microvascular and macrovascular complications[J]. *Exp Biol Med*, 2016, 241(12): 1323-1331.
- [10] Loehr LR, Meyer ML, Poon AK, et al. Prediabetes and diabetes are associated with arterial stiffness in older adults: the ARIC study[J]. *Am J Hypertens*, 2016, 29(9): 1038-1045.
- [11] 韦秀英, 胡世红, 韦 汐, 等. 2 型糖尿病患者动脉僵硬与早期糖尿病肾病的关系[J]. *中国老年学杂志*, 2011, 31(8): 1303-1305.
- [12] 聂 颖, 陈宝霞, 冯新恒, 等. 应用脉搏波传导速度及瞬时波强技术联合评价初发高血压患者的动脉弹性[J]. *中华医学杂志*, 2012, 92(11): 764-767.
- [13] 王 钺, 桑婉玥, 吕忠英, 等. 脉搏波传导速度与中青年原发性高血压患者早期肾损害的相关性及诊断价值[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2020, 28(1): 44-48.
- [14] Gotschy A, Bauer E, Schrodtt C, et al. Local arterial stiffening assessed by MRI precedes atherosclerotic plaque formation[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(6): 916-923.
- [15] Koivisto T, Lyytikäinen LP, Aatola H, et al. Pulse wave velocity predicts the progression of blood pressure and development of hypertension in young adults[J]. *Hypertension*, 2018, 71(3): 451-456.
- [16] Willum HT, Staessen JA, Torp PC, et al. Prognostic value of aortic pulse wave velocity as index of arterial stiffness in the general population[J]. *Circulation*, 2006, 113(5): 664-670.
- [17] Francesco US, van der Cammen Tischa JM, Hofman A, et al. Arterial stiffness and risk of coronary heart disease and stroke[J]. *Circulation*, 2006, 113(5): 657-663.
- [18] Zhong Q, Hu MJ, Cui YJ, et al. Carotid-femoral pulse wave velocity in the prediction of cardiovascular events and mortality: an updated systematic review and Meta-analysis[J]. *Angiology*, 2018, 69(7): 617-629.
- [19] Ohkuma T, Ninomiya T, Tomiyama H, et al. Brachial-ankle pulse wave velocity and the risk prediction of cardiovascular disease: an individual participant data Meta-analysis[J]. *Hypertension*, 2017, 69(6): 1045-1052.
- [20] Pereira T, Maldonado J, Pereira L, et al. Aortic stiffness is an independent predictor of stroke in hypertensive patients[J]. *Arq Bras Cardiol*, 2013, 100(5): 437-443.
- [21] Jung CH, Lee WY, Kim SY, et al. The relationship between coronary artery calcification score, plasma osteoprotegerin level and arterial stiffness in asymptomatic type 2 DM[J]. *Acta Diabetol*, 2010, 47(1): 145-152.
- [22] Ozkan Duman O, Goldeli O, Gursul E, et al. The value of aortic pulse wave velocity in predicting coronary artery disease diagnosis and severity[J]. *Acta Cardiol*, 2015, 70(3): 315-322.
- [23] Hofmann B, Riemer M, Erbs C, et al. Carotid to femoral pulse wave velocity reflects the extent of coronary artery disease[J]. *J Clin Hypertens*, 2014, 16(9): 629-633.
- [24] Kim JH, Rhee MY, Kim YS, et al. Brachial-ankle pulse wave velocity for the prediction of the presence and severity of coronary artery disease [J]. *Clin Exp Hypertens*, 2014, 36(6): 404-409.
- [25] Chung CM, Yang TY, Lin YS, et al. Relation of arterial stiffness assessed by brachial-ankle pulse wave velocity to complexity of coronary artery disease[J]. *Am J Med Sci*, 2014, 348(4): 294-299.
- [26] Lee JY, Ryu S, Lee SH, et al. Association between brachial-ankle pulse wave velocity and progression of coronary artery calcium: a prospective cohort study[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2015, 14(1): 147-156.
- [27] 余 飞, 洪贵平, 程铁牛, 等. 踝臂指数及肱-踝脉搏波传导速度对老年冠心病患者冠状动脉病变程度的预测价值[J]. *安徽医学*, 2018, 39(1): 42-45.
- [28] Chae MJ, Jung IH, Jang DH, et al. The brachial ankle

- pulse wave velocity is associated with the presence of significant coronary artery disease but not the extent[J]. *Korean Circ J*, 2013, 43(4): 239-245.
- [29] Chiha J, Mitchell P, Gopinath B, et al. Prediction of coronary artery disease extent and severity using pulse wave velocity[J]. *PLoS One*, 2016, 11(12): 112-122.
- [30] Townsend RR, Anderson AH, Chirinos JA, et al. Association of pulse wave velocity with chronic kidney disease progression and mortality: findings from the CRIC study (chronic renal insufficiency cohort) [J]. *Hypertension*, 2018, 71(6): 1101-1107.
- [31] Sarafidis PA, Loutradis C, Karpetas A, et al. Ambulatory pulse wave velocity is a stronger predictor of cardiovascular events and all-cause mortality than office and ambulatory blood pressure in hemodialysis patients[J]. *Hypertension*, 2017, 70(1): 148-157.
- [32] Sarafidis P, Loutradis C, Mayer C, et al. Weak within-individual association of blood pressure and pulse wave velocity in hemodialysis is related to adverse outcomes[J]. *J Hypertens*, 2019, 37(11): 2200-2208.
- [33] Gale NS, Albarrati AM, Munnery MM, et al. Aortic pulse wave velocity as a measure of cardiovascular risk in chronic obstructive pulmonary disease: two-year follow-up data from the ARCADE Study[J]. *Medicina*, 2019, 55(4): 89-101.
- [34] Ahn KT, Jeong JO, Jin SA, et al. Brachial-ankle PWV for predicting clinical outcomes in patients with acute stroke[J]. *Blood Press*, 2017, 26(4): 204-210.
- [35] 王洁蕊, 胡玉琴, 石慧婧, 等. 累积尿酸暴露与臂踝动脉脉搏波传导速度的关系[J]. *中华风湿病学杂志*, 2019, 23(4): 220-227.
- [36] Karpettas N, Destounis A, Kollias A, et al. Prediction of treatment-induced changes in target-organ damage using changes in clinic, home and ambulatory blood pressure [J]. *Hypertens Res*, 2014, 37(6): 543-547.
- [37] Okamoto M, Shipley MJ, Wilkinson IB, et al. Does poorer pulmonary function accelerate arterial stiffening? -- A cohort study with repeated measurements of carotid-femoral pulse wave velocity [J]. *Hypertension*, 2019, 74(4): 929-935.
- [38] Triantafyllis K, de Blasi M, Lütgendorf F, et al. High cardiovascular risk in mixed connective tissue disease: evaluation of macrovascular involvement and its predictors by aortic pulse wave velocity[J]. *Clin Exp Rheumatol*, 2019, 37(6): 994-1002.
- [39] Poon AK, Meyer ML, Selvin E, et al. A novel index of insulin resistance and segment-specific pulse wave velocity: the atherosclerosis risk in communities (ARIC) study[J]. *Circulation*, 2016, 133(Suppl 1): 54.
- [40] Ojima S, Kubozono T, Kawasoe S, et al. Gender differences in the risk factors associated with atherosclerosis evaluated by carotid intima-media thickness, plaque score and pulse wave velocity [J]. *Circulation*, 2019, 140(Suppl 1): 268.
- [41] 王来明, 于俊杏, 王燕, 等. BMI 轨迹与踝臂脉搏波传导速度的关联[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2017, 25(10): 1041-1046.
- [42] Syed-Abdul MM, Hu Q, Jacome-Sosa M, et al. Effect of carbohydrate restriction-induced weight loss on aortic pulse wave velocity in overweight men and women [J]. *Appl Physiol Nutr Me*, 2018, 43(12): 1247-1256.
- [43] Ong KT, Delorme S, Pannier B, et al. Aortic stiffness is reduced beyond blood pressure lowering by short-term and long-term antihypertensive treatment: a Meta-analysis of individual data in 294 patients[J]. *J Hypertens*, 2011, 29(6): 1034-1042.
- [44] Raghuraman R, Carney C, Mullahy H, et al. Effects of candesartan versus amlodipine on capillary rarefaction, pulse wave velocity, and central blood pressure in patients with essential hypertension[J]. *J Non Invasive Vasc Invest*, 2017, 2(1): 8-15.
- [45] Webb DR, Davies MJ, Gray LJ, et al. Searching for the right outcome? --A systematic review and Meta-analysis of controlled trials using carotid intima-media thickness or pulse wave velocity to infer antiatherogenic properties of thiazolidinediones[J]. *Diabetes Obes Metab*, 2010, 12(2): 124-132.
- [46] de Boer SA, Heerspink HJL, Juárez Orozco LE, et al. Effect of linagliptin on pulse wave velocity in early type 2 diabetes: A randomized, double-blind, controlled 26-week trial (RELEASE) [J]. *Diabetes Obes Metab*, 2017, 19(8): 1147-1154.
- [47] Rizos EC, Agouridis AP, Elisaf MS. The effect of statin therapy on arterial stiffness by measuring pulse wave velocity: a systematic review [J]. *Curr Vasc Pharmacol*, 2010, 8(5): 638-644.
- (此文编辑 曾学清)