

超极速脉搏波技术定量评估早期高血压患者 颈动脉弹性衰退的临床应用价值*

王银萍¹ 朱正球¹ 高慧¹ 吴林琳¹ 栾云¹ 刘福明² 邹冲² 黄辉¹

(江苏省中医院·南京中医药大学附属医院 1. 超声医学科; 2. 心内科, 江苏 南京 210029)

【摘要】 目的 探讨超极速脉搏波(ufPWV)技术定量评估早期高血压患者颈动脉弹性衰退的临床应用价值。方法 纳入 2018 年 5 月—2019 年 2 月于我院门诊及入院的共 90 例连续的高血压受试者(高血压组),依据血压水平将高血压组分为高血压 1 组和高血压 2 组;另将同期体检的健康志愿者 66 名纳入研究作为正常组。利用二维超声测量颈动脉内膜中层厚度(cIMT),再利用 ufPWV 技术测量收缩早期脉搏波速度(PWV-BS)及收缩末期脉搏波速度(PWV-ES)。以 cIMT 0.05 cm 为诊断内中膜增厚的阈值,将正常组及高血压 1 组及高血压 2 组均进一步分为 A 组(cIMT \leq 0.05 cm)、B 组(cIMT $>$ 0.05 cm)2 个亚组,正常组有 62 例(正常组 A 亚组),高血压 1 组有 11 例(高血压 1 组 A 亚组)及高血压 2 组有 8 例(高血压 2 组 A 亚组)。利用 Pearson's 相关性分析探讨 3 组 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 的变化趋势及各自与年龄的相关性,并比较 cIMT 在正常范围(\leq 0.05 cm)时 3 组中 PWV-BS 及 PWV-ES 的差异以评估 PWV-BS 及 PWV-ES 诊断效能。结果 高血压 1 组、高血压 2 组与正常组颈动脉弹性参数 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 比较差异有统计学意义(均 $P < 0.05$),并且高血压 2 组 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 均高于高血压 1 组及正常组,高血压 2 组与高血压 1 组 PWV-ES 比较差异有统计学意义($P < 0.05$),cIMT、PWV-BS 比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。颈动脉弹性参数与年龄的相关性分析显示,正常组及高血压 1 组 PWV-ES($r = 0.693, P < 0.001; r = 0.618, P < 0.001$)与年龄相关性显著优于 PWV-BS($r = 0.377, P = 0.006; r = 0.474, P < 0.001$)及 cIMT($r = 0.417, P < 0.001; r = 0.423, P = 0.001$),高血压 2 组 PWV-ES($r = 0.872, P < 0.001$)与年龄相关性显著优于 cIMT($r = 0.486, P = 0.003$),高血压 2 组 PWV-BS 与年龄无明显相关($P = 0.133$)。颈动脉弹性参数 PWV-ES 与年龄的单因素回归分析显示,正常组($\beta = 0.089, P < 0.001$)与高血压 1 组($\beta = 0.105, P < 0.001$)及高血压 2 组($\beta = 0.118, P < 0.001$)两两相互比较,其上升趋势依次显著增高。高血压 1 组及 2 组中 A 亚组分别与正常组 A 亚组 PWV-BS 及 PWV-ES 比较,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。结论 ufPWV 技术可捕获到 cIMT 增厚前的动脉弹性改变,可作为定量评估早期高血压患者颈动脉弹性改变的一种简便、无创方法。

【关键词】 超极速脉搏波;高血压;早期高血压;颈动脉弹性

【中图分类号】 R445.1;R544.1 **【文献标志码】** A **DOI:**10.3969/j.issn.1672-3511.2023.04.026

Effect of early hypertensive patients on carotid elastic recession quantified with ultrafast pulse wave velocity

WANG Yinping¹, ZHU Zhengqiu¹, GAO Hui¹, WU Linlin¹, LUAN Yun¹, LIU Fuming², ZOU Chong², HUANG Hui¹

(1. Department of Ultrasound Medicine, The Affiliated Hospital of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Nanjing 210029, China;

2. Department of Cardiology, The Affiliated Hospital of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, Nanjing 210029, China)

【Abstract】 **Objective** To explore the clinical application value of ultrafast pulse wave velocity (ufPWV) technology in quantitative evaluation of carotid elastic recession in early hypertensive patients. **Methods** 66 patients in the normal control group and 90 patients in the hypertension group were detected. The hypertension group was divided into hyper-

基金项目:江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2020683);江苏省第十六批“六大人才高峰”创新人才团队项目(TD-SWYY-069);江苏省中管局中医药科技发展计划重点项目(ZD201906)

通讯作者:黄辉,副主任医师,E-mail:szerhh007@vip.163.com

引用本文:王银萍,朱正球,高慧,等.超极速脉搏波技术定量评估早期高血压患者颈动脉弹性衰退的临床应用价值[J].西部医学,2023,35(4):599-603. DOI:10.3969/j.issn.1672-3511.2023.04.026

tension group 1 and hypertension group 2 according to the blood pressure level. Carotid intima-media thickness (cIMT) was measured by two dimension ultrasound, and pulse wave velocity of beginning systole (PWV-BS) and pulse wave velocity of end systole (PWV-ES) were measured by uFPWV technique. cIMT ≤ 0.05 cm was used as the threshold for the diagnosis of medial and middle membrane thickening, the normal group and the hypertension group 1 and 2 were further divided into two subgroups: Group A (cIMT ≤ 0.05 cm) and Group B (cIMT > 0.05 cm). Pearson's correlation analysis was used to investigate the variation trend of cIMT, PWV-BS and PWV-ES in these three groups and their correlation with age, and to compare the differences of PWV-BS and PWV-ES in these three groups when cIMT was in the normal range (≤ 0.05 cm). **Results** There were significant differences in age, body mass index, low density lipoprotein, high density lipoprotein, triglyceride and other parameters between the normal group and the hypertension group (all $P < 0.05$). The cIMT, PWV-BS and PWV-ES of hypertensive group 2 were higher than those of hypertensive group 1 and normal group. There were significant differences in Carotid elastic parameters cIMT and PWV-BS and PWV-ES in hypertension group 1, hypertension group 2 and normal group (all $P < 0.05$). Among them, hypertension group 2 $>$ hypertension group 1 $>$ normal group. In the comparison of three parameters between hypertension group 2 and hypertension group 1, there were significant differences in PWV-ES ($P < 0.05$), but no significant differences in cIMT and PWV-BS ($P > 0.05$). The correlation between PWV-ES ($r = 0.693, P < 0.001; r = 0.618, P < 0.001$) and age was significantly better than correlation between PWV-BS ($r = 0.377, P = 0.006; r = 0.474, P < 0.001$) and cIMT ($r = 0.417, P < 0.001; r = 0.423, P = 0.001$) and age in normal group and hypertension group 1. The correlation between PWV-ES ($r = 0.872, P < 0.001$) and age was significantly better than that between cIMT ($r = 0.486, P = 0.003$) and age, while there was no significant correlation between PWV-BS and age in hypertension group 2 ($P = 0.133$). The regression analysis of carotid elastic parameters PWV-ES and age showed that the upward trend increased significantly orderly in the comparison between the normal group ($\beta = 0.089, P < 0.001$) and the hypertension group ($\beta = 0.105, P < 0.001$) and the hypertension group ($\beta = 0.118, P < 0.001$). When cIMT ≤ 0.05 cm, there were 62 cases in normal group (normal group A), 11 cases in hypertensive group 1 (hypertensive group 1 group A) and 8 cases in hypertensive group 2 (hypertensive group 2 group A). PWV-BS and PWV-ES in hypertensive group 1 and group 2 were significantly different from those in normal group A (all $P < 0.05$). **Conclusion** The uFPWV technique can capture the changes in arterial elasticity before the thickening of cIMT, and it can be used as a simple and non-invasive method to quantitatively evaluate the changes in carotid artery elasticity in patients with early hypertension.

【Key words】 Ultrafast pulse wave velocity; High blood pressure; Early hypertension; Carotid elasticity

高血压是一种最常见的慢性疾病,是心脑血管疾病发生发展的重要危险因素,可伴随心、脑、肾等靶器官损伤,最终可导致器官衰竭^[1]。根据 2018 年欧洲心脏病学会高血压管理指南,2015 年全球高血压患病人数为 11.3 亿,至 2025 年,估计高血压患者的人数增加 20%左右,高达 15 亿人^[2]。我国的《中国高血压防治指南 2018 年修订版》认为脉搏波传导速度(Pulse wave velocity, PWV)增快是心血管事件和全因死亡的强预测因子,也是测量大动脉硬度的金标准^[3]。超极速脉搏波(ultrafast pulse wave velocity, uFPWV)是利用超快速瞬时拍照(大于 2000 帧/s)的一种新型无创超声成像技术,其测值结果较以往传统 PWV 检测具有更高的稳定及更好的重复性^[4]。本文利用 uFPWV 技术定量评估高血压患者颈动脉弹性衰退的变化,以期更好地为早期高血压患者提供可靠性参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料 共纳入 2018 年 5 月—2019 年 2 月于我院门诊及入院的共 90 名连续的高血压受试者,

参照《高血压防治指南》2018 年修订版,依据血压水平将高血压分为高血压 1 组和高血压 2 组。高血压 1 组(收缩压 ≤ 140 mmHg 和(或)舒张压 ≤ 90 mmHg)共 55 例,男性 26 例,女性 29 例,年龄 32~80 岁,平均(58.90 \pm 12.30)岁;高血压 2 组(收缩压 ≥ 140 mmHg 和(或)舒张压 ≥ 90 mmHg)共 35 例,男性 19 例,女性 16 例,年龄 32~78 岁,平均年龄(59.00 \pm 12.60)岁。另将同期体检的健康志愿者 66 名纳入研究作为正常组,男性 16 例,女性 50 例,年龄 23~50 岁,平均(35.70 \pm 7.80)岁。以 cIMT 0.05 cm 作为参考体系为诊断内中膜增厚的阈值,3 组分别进一步分为 A 组(cIMT ≤ 0.05 cm)、B 组(cIMT > 0.05 cm)2 个亚组。纳入标准:符合《高血压防治指南》2018 年修订版中原发性高血压诊断标准,以及规律服用降压药物有效控制血压者。排除标准:心脑血管疾病、动脉粥样硬化斑块、内分泌疾病等严重影响血管弹性改变的疾病;患其他严重疾病等无法完成及配合检查者。

1.2 仪器与操作方法 法国声科 Aixplorer Super-sonic 超声诊断仪,探头(SL2-10)频率为 2~10 MHz。

嘱患者静息平卧位, 头部略后仰, 行颈动脉二维超声检查, 系统自动测量出颈总动脉后壁 cIMT, 重复 3 次, 并记录平均值为最终值; 患者屏气 5 s, 行 ufPWV 检测, 系统自动测量脉搏波 PWV-BS 及 PWV-ES, 重复 3 次, 取平均值为最终值(图 1)。同时检测记录每位受检者一般资料, 如年龄、体重指数、高密度脂蛋白、低密度脂蛋白等参数。

1.3 统计学分析 采用 SPSS 22.0 统计软件分析, 对符合正态分布的计量资料均以($\bar{x} \pm s$)表示, 不符合正态分布以中位数表示。组间一般计量资料比较采用独立样本 *t* 检验, 组间年龄、cIMT、PWV-BS、PWV-

ES 数据比较, 若方差齐性采用单因素方差分析(One-way ANOVA), 若方差不齐, 则用非参数检验。组间 cIMT、PWV-BS、PWV-ES 与年龄的相关性采用 Pearson's 相关性分析。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料比较 正常组与高血压组在年龄、体重指数、低密度脂蛋白、高密度脂蛋白、甘油三酯、总胆固醇、葡萄糖、尿酸、肌酐、尿素、收缩压、舒张压、血红蛋白、谷丙转氨酶、谷草转氨酶等比较差异有统计学意义(均 $P < 0.05$), 而两组在白细胞计数、红细胞计数、血小板等比较差异无统计学意义(均 $P > 0.05$), 见表 1。

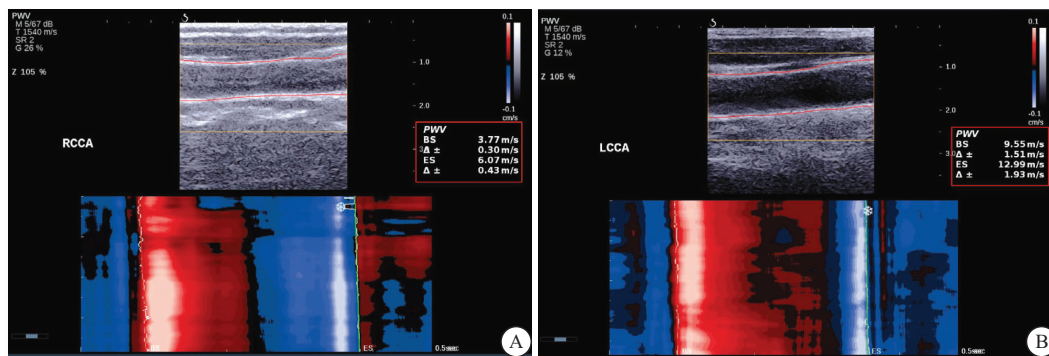


图 1 颈总动脉 PWV 采集图

Figure 1 Images of PWV collection in common carotid artery

注: A. 女性, 28 岁, 颈总动脉 PWV-BS 为 3.77 m/s, PWV-ES 为 6.07 m/s; B. 男性, 61 岁, 颈总动脉 PWV-BS 为 9.55 m/s, PWV-ES 为 12.99 m/s(红框所示)。

表 1 所有人群一般资料及测量结果($\bar{x} \pm s$)

Table 1 General information and measurement results for all subjects

一般资料	正常组(n=66)	高血压组(n=90)	总体(n=156)	P
年龄(岁)	35.70±7.80	58.90±12.30	49.10±15.60	<0.001
体重指数(kg/m ²)	20.10±1.80	24.70±2.80	23.10±3.10	<0.001
低密度脂蛋白(mmol/L)	2.22±0.46	2.67±0.95	2.48±0.81	0.001
高密度脂蛋白(mmol/L)	1.63±0.36	1.28±0.37	1.43±0.40	<0.001
甘油三酯(mmol/L)	0.74±0.34	2.11±1.81	1.53±1.54	<0.001
总胆固醇(mmol/L)	4.41±0.69	4.83±1.56	4.65±1.28	0.044
葡萄糖(mmol/L)	4.71±0.40	5.43±1.57	5.12±1.27	<0.001
尿酸(μmol/L)	259.70±74.60	363.4±127.3	319.50±119.50	<0.001
肌酐(μmol/L)	64.50±13.0	154.10±174.20	116.30±139.50	<0.001
尿素(mmol/L)	4.82±1.32	9.44±7.19	7.48±5.97	<0.001
收缩压(mmHg)	111.50±9.30	138.90±19.90	127.30±21.20	<0.001
舒张压(mmHg)	68.10±6.60	79.40±11.90	74.60±11.50	<0.001
血红蛋白(g/L)	135.10±14.00	122.20±24.10	127.60±21.40	<0.001
白细胞计数(10 ⁹ /L)	5.80±1.50	6.10±2.10	6.00±1.80	0.395
红细胞计数(10 ¹² /L)	6.40±15.20	4.00±0.80	5.00±9.90	0.202
血小板(10 ⁹ /L)	211.00±58.70	201.40±71.30	205.10±66.30	0.357
谷丙转氨酶(U/L)	18.80±12.50	28.40±21.20	24.40±18.60	0.001
谷草转氨酶(U/L)	18.60±5.70	25.10±14.80	22.40±12.20	0.001

2.2 组间 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 变量之间比较 高血压 1 组及高血压 2 组分别与正常组颈动脉弹性参数 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 比较差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$), 高血压 2 组与高血压 1 组

PWV-ES 比较差异有统计学意义($P < 0.05$), cIMT、PWV-BS 比较差异无统计学意义($P > 0.05$), 见表 2。

表 2 组间 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 比较($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of statistical variables

组别	n	cIMT(cm)	PWV-BS(m/s)	PWV-ES(m/s)
正常组	66	0.045±0.004	5.63±0.87	6.12±0.10
高血压 1 组	55	0.059±0.012	6.31±1.23	9.12±2.01
高血压 2 组	35	0.061±0.133	6.46±1.15	10.19±1.70
P 值 [§]		<0.001	0.001	<0.001
P 值 ^{§§}		<0.001	<0.001	<0.001
P 值 ^{§§§}		0.496	0.570	0.013

注: P 值[§]表示高血压 1 组与正常组比较; P 值^{§§}表示高血压 2 组与正常组比较; P 值^{§§§}表示高血压 2 组与高血压 1 组比较。

2.3 组间 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 变量与年龄之间的相关性分析 正常组与高血压 1 组中 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 及高血压 2 组 cIMT 及 PWV-ES 与年龄回归分析显示均与年龄有良好的相关性, 高血压 2 组 PWV-BS($r=0.259, P=0.133$)与年龄无明显相关, 每组中 PWV-ES 与年龄相关性(正常组 $r=0.693, P < 0.001$; 高血压 1 组 $r=0.618, P < 0.001$; 高血压 2 组 $r=0.872, P < 0.001$)显著优于每组中 cIMT 与年龄相关性(正常组 $r=0.417, P < 0.001$; 高血压 1 组 $r=0.423, P < 0.001$; 高血压 2 组 $r=0.486, P <$

0.001)。高血压 2 组 cIMT 及 PWV-ES 斜率 ($\beta = 0.000515, 0.118$) > 高血压 1 组 cIMT 及 PWV-ES 斜率 ($\beta = 0.000398, 0.1049$) > 正常组 cIMT 及 PWV-ES 斜率 ($\beta = 0.000209, 0.0890$), 见图 2。

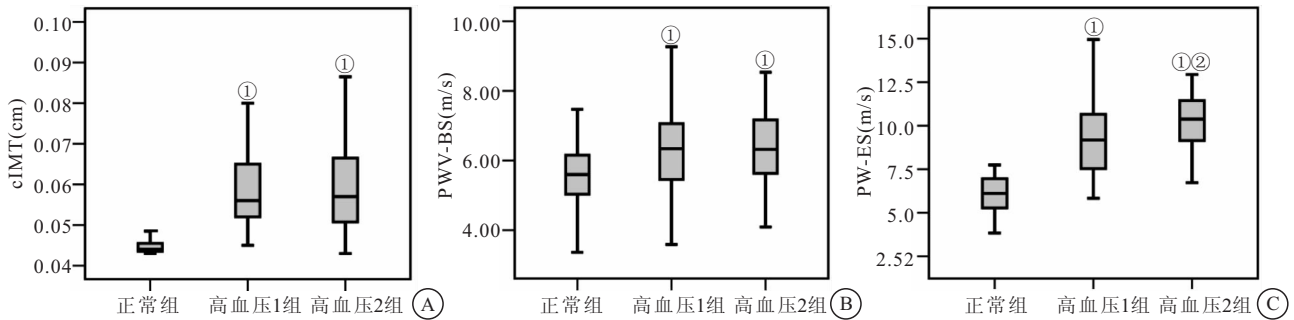


图 2 正常组、高血压 1 组及高血压 2 组的 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 与年龄的相关性比较

Figure 2 Correlation between cIMT, PWV-BS and PWV-ES and age in normal group, hypertensive group 1 and hypertensive group 2

注: A. cIMT 与年龄的相关性; B. PWV-BS 与年龄的相关性; C. PWV-ES 与年龄的相关性。与正常组比较, ① $P < 0.05$; 与高血压 1 组比较, ② $P < 0.05$ 。

2.4 3 组中 A 亚组的 PWV-BS 及 PWV-ES 变量之间比较 高血压 1 组及 2 组 A 亚组分别与正常组 A 亚组 PWV-BS 及 PWV-ES 比较差异均有统计学意义 ($P < 0.05$), 见表 3。

表 3 3 组中 A 亚组的 PWV-BS 及 PWV-ES 变量之间比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Comparison of PWV-BS and PWV-ES variables of group A among the three groups when cIMT ≤ 0.05 cm

组别	n	PWV-BS(m/s)	PWV-ES(m/s)
正常组 A 亚组	62	5.64 ± 0.87	6.06 ± 0.99
高血压 1 组 A 亚组	11	8.18 ± 2.11 ^①	8.18 ± 2.11 ^①
高血压 2 组 A 亚组	8	8.96 ± 1.51 ^①	8.96 ± 1.51 ^①

注: 与正常组 A 亚组比较, ① $P < 0.05$ 。

3 讨论

心血管疾病是危害人类健康的首要原因, 占全世界所有死亡的近 1/3 左右^[5], 而血压水平与心血管风险程度呈连续、独立、正相关^[3]。高血压的血管损害主要包括内皮细胞功能障碍、血管重塑和动脉粥样硬化, 内皮细胞功能障碍属于血管的功能改变, 早于血管重塑和动脉粥样硬化的结构改变^[6]; 在临床实践中, 检测 cIMT 被认为是一种有效评估动脉粥样硬化结构改变的方法^[7]。而大量研究证实, 在 cIMT 未发生增厚之前, 动脉粥样硬化风险组的动脉弹性较正常人比已经发生显著的衰退^[8-10]。Gotschy 等^[11]研究证实动脉粥样硬化模型小鼠的动脉管壁增厚晚于 PWV 改变约 12 周以上; 何婧等^[12]研究显示 PWV 预测原发性高血压视网膜病变程度效果显著优于 cIMT。本研究结果显示, 当 cIMT 在正常范围之内, 高血压组 PWV-BS 及 PWV-ES 与正常组比较差异有统计学意义, 说明 PWV 技术可早期定量评估动脉壁弹性的改变, 能够在血管内皮功能改变而结构尚未发生变化时就能检测到这种血管功能的异常, 有利于发现早期高血压患者, 从而减低心血管疾病的发生及发展^[13-14]。

脉搏波速度 (Pulse wave velocity, PWV) 是心脏每次搏动射血产生的沿大动脉壁传播的压力波传导速度, 通过检测脉搏波在某一段血管两点之间的体表距离从而计算脉搏波传导距离与时间的比值即为 PWV, 血管弹性降低, 脉搏波在血管中传播速度加快, 即 PWV 越高, 血管弹性硬度越高, 顺应性越差, PWV 已成为检测评估血管僵硬度的“金标准”, 可量化评估动脉的僵硬程度^[3,15], 成为心血管风险强有力的预测因子及高血压的靶器官损害进展的标志^[8]。ufPWV 作为一种新型超极速超声成像技术, 是采用超快速瞬时拍照 (大于 2000 帧/s) 成像技术, 明显区别于传统的 PWV 技术, 避免了距离及时间测量的误差, 其测值结果具有更高的稳定及更好的重复性^[16]。Li 等^[17]研究显示, ufPWV 值与高血压分期呈正相关。Sueta 等^[18]研究显示, PWV 与心血管疾病患者的收缩压呈正相关。本文研究亦显示, 高血压 1 组及 2 组的 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 值明显高于正常组, PWV-ES 值在高血压 2 组与高血压 1 组比较差异有统计学意义, 可认为 PWV-ES 值在高血压患者中与血压水平呈正相关。因此, ufPWV 值可提供动脉壁弹性的定量数据, 可能会成为预测高血压严重程度的指标。

动脉壁弹性受各种因素的影响, 其中年龄对动脉壁弹性起决定性作用^[19], 随年龄增长, 动脉弹性蛋白减少, 胶原纤维沉积, 动脉壁逐渐硬化, 动脉壁弹性与年龄呈显著负相关, 年龄是动脉壁弹性指标的独立影响因素, 不论是正常血压人群还是高血压人群中, 随着年龄的增加, 动脉弹性逐渐下降^[20-21], 故本文将 cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 分别与年龄做相关性分析, 结果显示每组中 PWV-ES 与年龄相关性显著优于每组中 PWV-BS 及 cIMT 与年龄相关性。这与 Diza 等^[22]研究显示一致, 认为年龄与脉搏波速度存在明显

正相关。我们前期研究亦证实^[8,23-24],cIMT、PWV-BS 及 PWV-ES 值随年龄增加而增高,与 cIMT 及 PWV-BS 相比,PWV-ES 是动脉粥样硬化的强烈预测因子。考虑主要原因如下:PWV-ES 代表了收缩期的脉搏波速度,这可能比 PWV-BS 更加精确,可能对年龄以及其他相关疾病引起的动脉僵硬度变化更敏感;PWV-ES 的测量不易受到早期外周反射的干扰^[13,25]。

本研究存在一些局限性,样本量稍偏小,正常组男性与女性比例存在差异,对结果可能存在一些影响;纳入的高血压患者有服药史,入选时未进行药物清洗,无法排除药物对 PWV 的影响。

4 结论

ufPWV 技术及其参数 PWV-ES 可作为定量评估高血压患者动脉弹性衰退及动脉粥样硬化发生发展的简便安全、高效准确的可靠指标,可对临床早期发现及预防高血压有良好的指导意义,亦可会成为预测高血压严重程度的指标,从而降低心脑血管疾病的发生发展。

【参考文献】

- [1] 周冰青,寿家玲,张余,等. 动态脉压与原发高血压患者左室肥厚的关系及预测价值 [J]. 西部医学,2021,33(3):384-387.
- [2] WILLIAMS B, MANCIA G, SPIERING W, *et al.* ESC Scientific Document Group. 2018 ESC/ESH Guidelines for the management of arterial hypertension [J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(33):3021-3104.
- [3] 中国高血压防治指南修订委员会,高血压联盟(中国),中华医学会心血管病学分会,等. 中国高血压防治指南(2018 年修订版) [J]. 中国心血管杂志,2019,24(1):24-56.
- [4] LI X, JIANG J, ZHANG H, *et al.* Measurement of carotid pulse wave velocity using ultrafast ultrasound imaging in hypertensive patients [J]. *Med Ultrason (2001)*, 2017, 44(2):183-190.
- [5] MIKAEL L R, PAIVA AMG, GOMES M M, *et al.* Vascular Aging and Arterial Stiffness [J]. *Arq Bras Cardiol*, 2017, 109(3):253-258.
- [6] VIRDIS A. Arterial Stiffness and Vascular Aging: From Pathophysiology to Treatment, with a Look at the Future [J]. *High Blood Press Cardiovasc Prev*, 2018, 25(2):135-136.
- [7] NAQVI T Z, LEE M S. Carotid intima-media thickness and plaque in cardiovascular risk assessment [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(10):1025-38.
- [8] ZHU Z Q, CHEN L S, WANG H, *et al.* Carotid stiffness and atherosclerotic risk: non-invasive quantification with ultrafast ultrasound pulse wave velocity [J]. *European radiology*, 2018, 29:1507-1517.
- [9] 周雪雁,潘晓芳,蒋婷,等. 健康人群颈动脉粥样硬化与臂踝脉搏波速度的相关性 [J]. 当代医学,2018,24(17):87-89.
- [10] 王银萍,戴萍,吴林琳,等. 超极速脉搏波评估年龄相关颈动脉弹性衰退 [J]. 西部医学,2021,33(3):444-447,453.
- [11] GOTSCHY A, BAUER E, SCHRODT C, *et al.* Local arterial stiffening assessed by MRI precedes atherosclerotic plaque formation [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(6):916-923.
- [12] 何婧,李明星,李友谊,等. 超极速脉搏波技术检测颈动脉硬化程度与原发高血压视网膜病变程度的相关性 [J]. 分子影像学杂志,2021,44(6):954-960.
- [13] YIN L X, MA C Y, WANG S, *et al.* Reference values of carotid ultrafast pulse-wave velocity: a prospective, multicenter, population-based study [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2021, 34(6):629-641.
- [14] YANG W, WANG Y, YU Y, *et al.* Establishing normal reference value of carotid ultrafast pulse wave velocity and evaluating changes on coronary slow flow [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(10):1931-1939.
- [15] 米迎,郭瑞君. 脉搏波传导速度评估高尿酸血症对颈动脉硬化的影响 [J]. 临床超声医学杂志,2020,22(2):154-155.
- [16] MARAIS L, PERNOT M, KHETTAB H, *et al.* Arterial Stiffness Assessment by Shear Wave Elastography and Ultrafast Pulse Wave Imaging: Comparison with Reference Techniques in Normotensives and Hypertensives [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2019, 45:758-772.
- [17] LI X P, JIANG J, ZHANG H, *et al.* Measurement of carotid pulse wave velocity using ultrafast ultrasound imaging in hypertensive patients [J]. *Journal of medical ultrasonics (2001)*, 2017, 44(2):183-190.
- [18] SUETA D, YAMAMOTO E, TANAKA T, *et al.* Association of estimated central blood pressure measured non-invasively with pulse wave velocity in patients with coronary artery disease [J]. *Ijc Heart Vasc*, 2015, 55:52-54.
- [19] CHEN W, LI L, WANG J, *et al.* Extracellular vesicle YRNA in atherosclerosis [J]. *Clin Chim Acta*, 2021, 517:15-22.
- [20] 马明怡,惠红,张晓卉. 高血压患者血压与 PWV、ABI 相关性的研究进展 [J]. 心脏杂志,2021,33(2):214-217.
- [21] 张婧婧,尹新华. 脉搏波传导速度在高血压靶器官损害中的临床应用进展 [J]. 中华老年多器官疾病杂志,2019, 18(7):544-547.
- [22] DIAZ A, TRINGLER M, WRAY S, *et al.* The effects of age on pulse wave velocity in untreated hypertension [J]. *J Clin Hypertens (Greenwich)*, 2018, 20(2):258-265.
- [23] 王银萍,朱正球,马学慧,等. 超极速脉搏波技术实时定量评估健康成人颈动脉弹性的模型确立及初步验证 [J]. 临床心血管病杂志,2021,37(9):862-866.
- [24] ZHU Z Q, CHEN L S, JIANG X Z, *et al.* Absent atherosclerotic risk factors are associated with carotid stiffening quantified with ultrafast ultrasound imaging [J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(5):3195-3206.
- [25] HUANG C, SU Y, ZHANG H, *et al.* Comparison of Different Pulse Waveforms for Local Pulse Wave Velocity Measurement in Healthy and Hypertensive Common Carotid Arteries in Vivo [J]. *Ultrasound Med Biol*, 2016, 42(5):1111-1123.

(收稿日期:2022-01-02;修回日期:2023-02-23;编辑:黎仕娟)