

· 临床研究 ·

动脉分析技术定量评价高血压合并缺血性脑卒中患者颈动脉结构及弹性的临床价值

胡文妹 孙 恒 聂淑婷 邵袁缘 李心怡 周 畅

摘 要 **目的** 探讨动脉分析技术定量评价高血压合并缺血性脑卒中患者颈动脉结构及弹性的临床价值。**方法** 选取于我院首次就诊的原发性高血压患者 140 例,根据是否合并缺血性脑卒中分为脑卒中组 72 例和无脑卒中组 68 例,另选同期年龄、性别与之相匹配的健康志愿者 74 例作为对照组。应用动脉分析技术获取颈动脉结构参数包括最小内径(Dmin)、最大内径(Dmax)、内-中膜厚度(IMT),以及弹性参数包括硬度指数(β)、动脉顺应性(AC)、弹性模量(EM)、单点脉搏波传导速度(PWV β)、纵向应变(RS)、纵向应变率(RSR)、周向应变(CS)及周向应变率(CSR),比较各组上述参数的差异。**结果** 与对照组比较,脑卒中组和无脑卒中组 Dmin、Dmax、IMT、 β 、EM、PWV β 均增大,AC、RS、RSR、CS、CSR 均减小,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$);与无脑卒中组比较,脑卒中组 Dmin、Dmax、IMT、 β 、PWV β 均增大,差异均有统计学意义(均 $P < 0.05$)。**结论** 高血压合并缺血性脑卒中患者较单纯高血压患者颈动脉结构及弹性改变更明显。动脉分析技术可用于定量评价高血压合并缺血性脑卒中患者颈动脉结构及弹性,为临床评估高血压患者发生缺血性脑卒中危险分层提供一定依据。

关键词 超声检查;动脉分析技术;高血压;缺血性脑卒中;颈动脉;弹性
[中图分类号]R445.1;R743.2 [文献标识码]A

Clinical value of arterial analysis technology in the quantitative evaluation of carotid artery structure and elasticity in hypertension patients complicated with ischemic stroke

HU Wenshu, SUN Heng, NIE Shuting, SHAO Yuanyuan, LI Xinyi, ZHOU Chang

Department of Ultrasound, Yichang Central People's Hospital, the First College of Clinical Medical Science,
China Three Gorges University, Hubei 443003, China

ABSTRACT **Objective** To explore the clinical value of arterial analysis technology in the quantitative evaluation of carotid artery structure and elasticity in hypertension patients complicated with ischemic stroke. **Methods** A total of 140 patients with essential hypertension in our hospital for the first diagnosis were selected and were divided into stroke group ($n=72$) and non-stroke group ($n=68$) according to whether they were complicated with ischemic stroke, and 74 healthy volunteers with matched age and gender were selected as control group. Carotid artery structure parameters including minimum inner diameter (Dmin), maximum inner diameter (Dmax), intima-media thickness (IMT), as well as elastic parameters including stiffness index (β), arterial compliance (AC), elastic modulus (EM), single-point pulse wave velocity (PWV β), radial strain (RS), radial strain rate (RSR), circumferential strain (CS) and circumferential strain rate (CSR) were obtained by arterial analysis technology. The differences of the above parameters among the groups were compared. **Results** Compared with the control group, Dmin, Dmax, IMT, β , EM and PWV β were increased in stroke group and non-stroke group, while AC, RS, RSR, CS and CSR were decreased, and the differences were statistically significant (all $P < 0.05$). Compared with non-stroke group, Dmin, Dmax, IMT, β and PWV β in stroke group were increased, and the differences were statistically significant (all $P < 0.05$). **Conclusion** Compared with patients with simple hypertension, the patients with hypertension complicated with ischemic stroke exhibit obvious changes of carotid artery structure and elasticity. Arterial analysis technology can be used to quantitatively evaluate carotid artery structure and elasticity in patients with hypertension complicated with ischemic stroke, and provide theoretical basis for evaluating risk

stratification in patients with hypertensive ischemic stroke in clinic.

KEY WORDS Ultrasonography; Arterial analysis technology; Hypertension; Ischemic stroke; Carotid arterial; Elasticity

我国脑卒中患病率逐年增长,已成为中老年人群死亡的主要原因之一,传统的危险因素并不足以解释所有脑卒中的发生^[1]。《中国心血管健康与疾病报告 2021》显示我国现有的高血压患者已达 2.45 亿,高血压是脑卒中的主要危险因素,识别高血压患者中易发生脑卒中的个体十分重要^[2]。颈动脉为供应大脑血液的主要血管,研究^[3]表明,颈动脉粥样硬化易损斑块是脑卒中的危险因素之一。然而,对于无颈动脉斑块的高血压患者,缺血性脑卒中的发生与颈动脉受损是否有关尚不清楚。动脉分析技术可用于无创评价动脉功能,其原理是利用矢量信号捕捉动脉壁的搏动信息,在二维动态图像上编码动脉壁运动形态,采集管壁位移变化,计算血管内径变化,自动分析出动脉结构及弹性参数。本研究应用动脉分析技术定量评价高血压合并缺血性脑卒中患者颈动脉结构及弹性,以期对高血压患者发生缺血性脑卒中危险分层提供理论依据。

资料与方法

一、研究对象

选取 2022 年 5 月至 2023 年 5 月在我院心内科及神经内科首次就诊的原发性高血压患者 140 例,根据是否合并缺血性脑卒中分为脑卒中组 72 例和无脑卒中组 68 例;脑卒中组中,男 38 例,女 34 例,年龄 35~80 岁,平均(58.93±7.67)岁;无脑卒中组中,男 35 例,女 33 例,年龄 35~80 岁,平均(58.69±7.77)岁。纳入标准:①高血压诊断参考《中国高血压防治指南(2018 年修订版)》^[4],即收缩压≥140 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)和/或舒张压≥90 mmHg;②急性缺血性脑卒中诊断参考《急性缺血性卒中血管内治疗中国指南 2018》^[5]。排除标准:①合并严重心脏病,如心房颤动、心肌梗死等;②合并严重的神经系统疾病,如重度帕金森病、阿尔茨海默病等;③颈动脉超声检测内-中膜厚度(IMT)≥1.5 mm 或颈动脉狭窄程度>50%;④合并糖尿病、结缔组织病、甲状腺相关疾病、吸烟史或其他影响颈动脉弹性的疾病;⑤缺乏必要的病史或图像质量不清晰。另选同期年龄、性别与之相匹配的 74 例健康体检者作为对照组,男 36 例,女 38 例,年龄 35~80 岁,平均(56.96±8.91)岁。本研究经我院医学伦理委员会批准,所有研究对象均知情同意。

二、仪器与方法

1. 颈动脉超声检查及图像分析:使用三星 RS85

彩色多普勒超声诊断仪,L3-12A 探头,频率 3~12 MHz;配备动脉分析技术。受试者取平卧位,并充分暴露颈部,于颈动脉分叉处下方 2 cm 近心端的位置扫查颈总动脉长轴和短轴切面,清晰显示颈动脉内中膜后,将取样框垂直于血管壁,嘱受试者屏住呼吸,获取 2 s 的颈总动脉运动图像。开启动脉分析技术,手动勾画动脉管壁后系统自动追踪并描绘血管壁的运动曲线图,测量颈动脉结构参数,包括最小内径(Dmin)、最大内径(Dmax)及 IMT^[6];软件自动计算颈动脉弹性参数,包括硬度指数(β)、动脉顺应性(AC)、弹性模量(EM)、单点脉搏波传导速度(PWVβ)、纵向应变(RS)、纵向应变率(RSR)、周向应变(CS)及周向应变率(CSR)。其中, $\beta = \ln(Ps/Pd)/(Dmax-Dmin)$ 、 $PWV\beta = \beta(Pd/2\rho)$ 、 $AC = \pi(Dmax^2 - Dmin^2)/[4(Ps - Pd)]$,Ps 和 Pd 分别表示收缩压和舒张压,ρ 为血液密度。左、右两侧颈总动脉分别测量 3 次,计算后取平均值。以上操作均由同一具有 8 年工作经验的超声医师完成。

2. 临床资料获取:颈动脉超声检查前所有受试者静息状态下测量血压,重复测量 3 次取平均值;同时收集性别、年龄、体质量指数(BMI),以及甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)。

3. 重复性检验:在所采集的图像中随机抽取 30 例(研究组 15 例,对照组 15 例),由上述同一超声医师间隔 1 个月后重复测量颈动脉结构及功能参数,进行观察者内重复性检验;由另一具有 8 年工作经验的超声医师对相同图像再次测量颈动脉结构及功能参数,进行观察者间重复性检验。

三、统计学处理

应用 SPSS 27.0 统计软件,计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,多组比较采用单因素方差分析,两两比较采用 LSD 法;计数资料以例表示,组间比较采用 χ^2 检验。观察者内及观察者间的重复性检验采用组内相关系数(ICC)进行评价,ICC>0.75 表示重复性较好。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、各组临床资料比较

与对照组比较,无脑卒中组和脑卒中组收缩压、

舒张压均更高,差异均有统计学意义(均 $P<0.001$);无脑卒中组与脑卒中组收缩压、舒张压比较差异均无统计学意义。各组年龄、性别、BMI、TG、HDL-C、LDL-C比较,差异均无统计学意义。见表1。

二、各组颈动脉结构及弹性参数比较

与对照组比较,无脑卒中组和脑卒中组 Dmin、Dmax、IMT、 β 、EM、PWV β 均增大,AC、RS、RSR、CS、

CSR 均减小,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$);与无脑卒中组比较,脑卒中组 Dmin、Dmax、IMT、 β 、PWV β 均增大,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。见表2和图1。

三、重复性检验

重复性检验显示,颈动脉结构及弹性参数观察者内和观察者间的重复性均较好(均 $ICC>0.75$,均 $P<0.05$)。见表3。

表1 各组临床资料比较

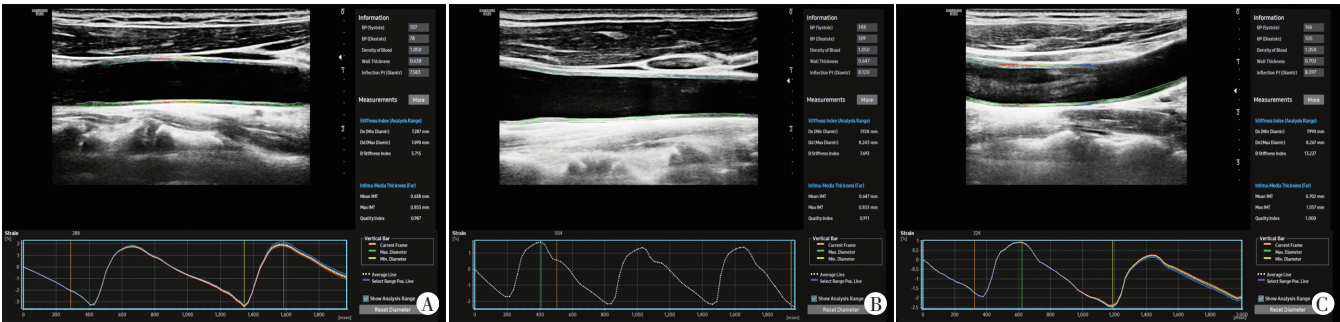
组别	年龄(岁)	男/女(例)	BMI(kg/m ²)	收缩压(mmHg)	舒张压(mmHg)	TG(mmol/L)	HDL-C(mmol/L)	LDL-C(mmol/L)
对照组(74)	56.96±8.91	36/38	22.31±1.91	125.01±7.19	82.44±5.89	1.72±0.21	1.20±0.14	2.01±0.49
无脑卒中组(68)	58.69±7.77	35/33	22.66±1.60	149.67±25.17 ^a	91.81±14.07 ^a	1.72±0.16	1.21±0.10	2.02±0.36
脑卒中组(72)	58.93±7.67	38/34	22.43±1.97	150.39±24.07 ^a	92.30±14.01 ^a	1.71±0.19	1.18±0.09	2.05±0.37
F/χ^2 值	1.269	0.348	1.139	66.858	28.503	0.051	0.263	0.697
P 值	0.283	0.840	0.322	<0.001	<0.001	0.950	0.769	0.499

与对照组比较,^a $P<0.05$ 。1 mmHg=0.133 kPa。BMI:体质量指数;TG:甘油三酯;HDL-C:高密度脂蛋白胆固醇;LDL-C:低密度脂蛋白胆固醇

表2 各组颈动脉结构及弹性参数比较($\bar{x}\pm s$)

组别	颈动脉结构参数(mm)			颈动脉弹性参数							
	Dmin	Dmax	IMT	β	AC(mm ² /kPa)	EM(kPa)	PWV β (m/s)	RS(%)	RSR(s ⁻¹)	CS(%)	CSR(s ⁻¹)
对照组(74)	7.03±0.95	7.53±0.95	0.81±0.12	6.93±1.99	0.79±0.30	145.56±53.31	7.14±1.56	5.80±1.63	0.69±0.21	6.11±1.69	0.72±0.23
无脑卒中组(68)	7.58±0.92 ^a	7.95±0.97 ^a	0.93±0.12 ^a	9.31±2.54 ^a	0.59±0.29 ^a	232.33±88.76 ^a	8.29±1.89 ^a	4.34±1.63 ^a	0.48±0.25 ^a	4.34±1.68 ^a	0.54±0.23 ^a
脑卒中组(72)	8.03±0.89 ^{ab}	8.57±0.90 ^{ab}	1.03±0.12 ^{ab}	12.05±4.02 ^{ab}	0.54±0.18 ^a	261.40±87.20 ^a	9.22±1.48 ^{ab}	4.15±1.63 ^a	0.46±0.20 ^a	4.70±1.52 ^a	0.49±0.23 ^a
F 值	21.606	22.659	64.978	69.841	27.961	67.835	48.657	38.966	22.855	23.278	19.256
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

与对照组比较,^a $P<0.05$;与无脑卒中组比较,^b $P<0.05$ 。Dmin:最小内径;Dmax:最大内径;IMT:内-中膜厚度; β :硬度指数;AC:动脉顺应性;EM:弹性模量;PWV β :单点脉搏波传导速度;RS:纵向应变;RSR:纵向应变率;CS:周向应变;CSR:周向应变率



A: 对照组一健康体检者(女,57岁)颈动脉 Dmin 为 7.287 mm,Dmax 为 7.690 mm,IMT 为 0.853 mm,PWV β 为 7.583 m/s, β 为 5.715;B: 无脑卒中组一患者(男,62岁)颈动脉 Dmin 为 7.928 mm,Dmax 为 8.243 mm,IMT 为 0.853 mm,PWV β 为 9.046 m/s, β 为 7.693;C: 脑卒中组一患者(男,60岁)颈动脉 Dmin 为 7.990 mm,Dmax 为 8.267 mm,IMT 为 1.057 mm,PWV β 为 8.097 m/s, β 为 13.227

图1 各组左侧颈总动脉长轴测量超声图

讨 论

目前脑卒中已成为全球第二大死亡原因,其高致死率和死亡率对社会造成了极大的负面影响^[7]。高血压是脑卒中的主要危险因素之一,其机制主要包括:①高血压会加速动脉硬化进程,促使颈动脉易损斑块的形成,斑块脱落造成脑血管栓塞;②长期高血压会使脑小动脉压力负荷增加、脑血管壁增厚,导致局部

脑组织血液供应不足,引起缺血性脑卒中^[2,8]。在动脉粥样硬化过程中,动脉弹性功能改变早于结构改变,动脉结构重塑前,其弹性功能可能已经严重受损^[9-10],因此联合动脉结构及弹性参数有助于更加准确地判断动脉硬化程度,指导临床及时干预。本研究结果显示,与对照组比较,无脑卒中组和脑卒中组 Dmin、Dmax 均增大,且脑卒中组增大更明显,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$),提示长期高血压会加重动脉负荷

表 3 观察者内和观察者间的重复性检验

参数	观察者内			观察者间		
	ICC 值	95% 可信区间	P 值	ICC 值	95% 可信区间	P 值
Dmin	0.94	0.88~0.97	<0.001	0.92	0.87~0.95	<0.001
Dmax	0.94	0.87~0.97	<0.001	0.89	0.74~0.95	<0.001
IMT	0.97	0.95~0.98	<0.001	0.85	0.69~0.93	<0.001
β	0.94	0.89~0.96	<0.001	0.92	0.84~0.96	<0.001
AC	0.92	0.84~0.96	<0.001	0.88	0.76~0.94	<0.001
EM	0.97	0.95~0.98	<0.001	0.88	0.74~0.95	<0.001
PWVβ	0.93	0.86~0.96	<0.001	0.81	0.70~0.88	<0.001
RS	0.94	0.91~0.97	<0.001	0.92	0.87~0.95	<0.001
RSR	0.95	0.91~0.98	<0.001	0.93	0.86~0.96	<0.001
CS	0.94	0.86~0.98	<0.001	0.85	0.77~0.95	<0.001
CSR	0.93	0.85~0.96	<0.001	0.87	0.79~0.92	<0.001

ICC:组内相关系数

引起的动脉管壁蛋白纤维断裂,导致血管重构引起的代偿性增大。Sedaghat 等^[11]研究发现在普通人群中颈动脉内径增大与不良心脑血管事件发生风险增加相关;Xue 等^[12]同样在一项横断面研究中发现将高血压人群颈动脉内径按照四分位数分组后,高四分位数的人群发生脑卒中的风险显著高于低四分位数人群($P<0.001$),提示颈动脉内径变化在高血压患者脑卒中危险分层中具有一定参考价值。但二维超声对颈动脉内径变化不敏感,动脉分析技术具有自动识别颈动脉 Dmin、Dmax 的优点,对于监测血管重构具有较高的临床应用价值。《中国脑卒中血管超声检查指导规范》^[13]指出,IMT 为血管后壁内膜上缘与外膜上缘的垂直距离,但并未提示取最大值还是平均值。临床工作中发现,颈总动脉内、中膜均呈不均匀增厚,2016 年张洁和郭立新^[6]在对全国 50 家医院内分泌科医务人员行颈动脉超声检查时选择左、右颈总动脉远端 10 mm 处的 IMT 最大值,取平均值作为颈动脉 IMT 值,推测取 IMT 最大值可能更符合临床实践。动脉分析技术可实现自动测量 2 s 内颈动脉 IMT 最大值,有效减少了不同超声医师主观操作造成的差异,测量更为客观、准确,故本研究选取 IMT 最大值进行比较,结果显示,与对照组比较,无脑卒中组和脑卒中组 IMT 均增大,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$),分析原因为持续血压升高激活了肾素-血管紧张素-醛固酮系统介导的各种血管活性物质,进而诱导动脉内膜纤维化和变性增厚^[14]。且脑卒中组较无脑卒中组 IMT 增大更明显,差异有统计学意义($P<0.05$),与国内一项队列研究^[15]结果一致。分析原因可能为:①高血压患者血压升高反映外周血管功能障碍,而 IMT 增大则反映颈动脉等大动脉结构损

伤,血压升高和 IMT 增大共同反映了外周血管和大动脉的损伤,二者对于脑卒中发生风险可能有协同作用;②炎症是脑卒中的危险因素之一^[16],炎症因子也会加速血管内皮的损伤,导致动脉内膜脂质沉积、纤维增生,因此脑卒中患者 IMT 增大更明显。

脉搏波速度(carotid pulse wave, PWV)是指心脏每次搏动因射血而产生的沿大动脉管壁传播的压力波传导速度,是预测心脑血管疾病的独立危险因素^[17]。但 PWV 测量时操作复杂,难以广泛应用于临床。动脉分析技术通过超声动态图像获取颈动脉弹性参数,包括 PWVβ、EM 及应变参数等,可在动脉壁出现形态学改变前评价其血管弹性改变和内皮弹性障碍。研究^[18]表明, PWVβ 与 PWV 在评价大血管弹性方面具有很好的一致性。已有研究^[19-21]应用 PWVβ、EM、应变等参数对颈动脉弹性进行定量评价,结果表明颈动脉弹性超声参数在预测心脑血管疾病风险方面具有较高的价值。本研究结果显示,与对照组比较,无脑卒中组和脑卒中组 β、EM、PWVβ 均增大, AC、RS、RSR、CS、CSR 均减小,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$),表明高血压患者颈动脉硬化程度高于健康人群,分析原因可能与长期高血压会损伤血管内皮细胞,促使动脉壁中的脂质沉积、炎症反应和纤维化有关^[22]。β 是评价动脉弹性的特有参数,由心动周期内血压与动脉直径相对变化的对数变换后计算得出,受血压影响小,该参数增大代表动脉弹性功能变差^[23]。研究^[24]表明,短时间药物干预能明显改善颈动脉 β,而颈动脉 IMT 或其他弹性参数变化却不明显,推测该参数对于反映动脉弹性损伤细微变化可能更为敏感。本研究脑卒中组 β 较无脑卒中组增大,差异有统计学意义($P<0.05$),表明 β 与缺血性脑卒中的发生有一定关系。本研究脑卒中组 PWVβ 较无脑卒中组增大,差异有统计学意义($P<0.05$),与既往研究^[25-27]结果一致。分析原因为: PWVβ 是通过实时跟踪动脉管壁血流压力来反映动脉弹性变化的,而高血压患者随心动周期血压变化更明显,压力过高时可导致脑血管损伤或破裂,压力不足可能造成脑灌注减少、脑缺血。颈动脉为脑血管的上游血管, PWVβ 反映的颈动脉弹性损伤可能与脑血管病变平行发展,故准确评价高血压患者颈动脉弹性对预测缺血性脑卒中发生具有一定的临床意义。另外,本研究重复性检验显示,颈动脉结构及弹性参数观察者内及观察者间的重复性均较好(均 ICC>0.75,均 $P<0.001$),表明动脉分析技术可用于临床开展应用。

综上所述,高血压患者颈动脉结构及弹性均已发

生改变,高血压合并缺血性脑卒中患者颈动脉结构及弹性改变更明显。应用动脉分析技术可定量评价高血压合并缺血性脑卒中患者颈动脉结构及弹性,为高血压患者发生缺血性脑卒中危险分层提供一定依据。但本研究样本量有限,且未将高血压患者病程纳入分析,今后将根据缺血性脑卒中的发生部位、时间进行分组,探讨其与颈动脉结构及弹性参数的关系。

参考文献

- [1] Virani SS, Alonso A, Benjamin EJ, et al. Heart Disease and Stroke Statistics—2020 Update: a Report from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2020, 141(9): 139–596.
- [2] Webb AJS, Werring DJ. New insights into cerebrovascular pathophysiology and hypertension[J]. *Stroke*, 2022, 53(4): 1054–1064.
- [3] Iannuzzi A, Rubba P, Gentile M, et al. Carotid atherosclerosis, ultrasound and lipoproteins[J]. *Biomedicines*, 2021, 9(5): 521.
- [4] 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.
- [5] 霍晓川, 高峰. 急性缺血性卒中血管内治疗中国指南 2018[J]. *中国卒中杂志*, 2018, 13(7): 706–729.
- [6] 张洁, 郭立新. 全国 50 家医院内分泌科医务人员血脂异常危险因素、血脂水平[J]. *中华内分泌代谢杂志*, 2016, 32(10): 814–187.
- [7] Feigin VL, Stark BA, Johnson CO, et al. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *Lancet Neurol*, 2021, 20(10): 795–820.
- [8] Baradaran H, Gupta A. Carotid artery stiffness: imaging techniques and impact on cerebrovascular disease[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9(15): 852173.
- [9] Saladini F, Rattazzi M, Faggini E, et al. Carotid elasticity is impaired in stage 1 hypertensive patients with well-controlled blood pressure levels[J]. *J Hum Hypertens*, 2022, 36(10): 898–903.
- [10] Xu S, Lyu QR, Ilyas I, et al. Vascular homeostasis in atherosclerosis: a holistic overview[J]. *Front Immunol*, 2022, 13(12): 976722.
- [11] Sedaghat S, van Sloten TT, Laurent S, et al. Common carotid artery diameter and risk of cardiovascular events and mortality[J]. *Hypertension*, 2018, 72(1): 85–92.
- [12] Xue W, Tian Y, Jing L, et al. Sex-specific prediction value of common carotid artery diameter for stroke risk in a hypertensive population: a cross-sectional study[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(2): 1428–1437.
- [13] 中国卫生计生委脑卒中防治工程委员会. 中国脑卒中血管超声检查指导规范[J]. *中华医学超声杂志(电子版)*, 2015, 12(8): 599–610.
- [14] Xue J, Kang X, Qin Q, et al. The impact of different left ventricular geometric patterns on right ventricular deformation and function in the elderly with hypertension: a two-dimensional speckle tracking and three-dimensional echocardiographic study[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 109(5): 311–320.
- [15] Sun P, Liu L, Liu C, et al. Carotid intima-media thickness and the risk of first stroke in patients with hypertension[J]. *Stroke*, 2020, 51(2): 379–386.
- [16] Mun KT, Hinman JD. Inflammation and the link to vascular brain health: timing is brain[J]. *Stroke*, 2022, 53(2): 427–436.
- [17] Fiori G, Fuiano F, Scorza A, et al. Non-invasive methods for PWV measurement in blood vessel stiffness assessment[J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2022, 15(1): 169–183.
- [18] 吴国祥, 李金国. 血管回声跟踪技术评价冠心病患者大动脉弹性功能的研究[J]. *中国循环杂志*, 2008, 23(3): 193–195.
- [19] Jin CX, Tian J, Yang HH, et al. A preliminary study of changes in carotid artery elasticity in type 2 diabetes mellitus[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2023, 43(3): 181–191.
- [20] Nechiporenko A, Tedla YG, Korcarz C, et al. Association of statin therapy with progression of carotid arterial stiffness: the multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA)[J]. *Hypertens Res*, 2023, 46(3): 679–687.
- [21] Robert C, Ling LH, Tan ESJ, et al. Effects of carotid artery stiffness on cerebral small-vessel disease and cognition[J]. *J Am Heart Assoc*, 2022, 11(23): e027295.
- [22] Pewowaruk RJ, Korcarz C, Tedla Y, et al. Carotid artery stiffness mechanisms associated with cardiovascular disease events and incident hypertension: the multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA)[J]. *Hypertension*, 2022, 79(3): 659–666.
- [23] Morioka T, Mori K, Emoto M. Is stiffness parameter β useful for the evaluation of atherosclerosis? Its clinical implications, limitations, and future perspectives[J]. *J Atheroscler Thromb*, 2021, 28(5): 435–453.
- [24] Lunder M, Janić M, Japelj M, et al. Empagliflozin on top of metformin treatment improves arterial function in patients with type 1 diabetes mellitus[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2018, 17(1): 153.
- [25] 杨妮, 胡静, 齐向华, 等. 脉搏波传导速度与缺血性脑卒中相关性的 Meta 分析[J]. *中国循环杂志*, 2022, 37(9): 940–945.
- [26] Yang Y, Wang A, Yuan X, et al. Association between healthy vascular aging and the risk of the first stroke in a community-based Chinese cohort[J]. *Aging (Albany, NY)*, 2019, 11(15): 5807–5816.
- [27] Jae SY, Heffernan KS, Kurl S, et al. Association between estimated pulse wave velocity and the risk of stroke in middle-aged men[J]. *Int J Stroke*, 2021, 16(5): 551–555.

(收稿日期: 2023-07-24)