

DOI:10.16781/j.0258-879x.2019.11.1197

· 论 著 ·

## 基于超声剪切波频散成像探讨颈动脉黏弹性与血流动力学的相关性

罗向红<sup>1△</sup>, 闫敏<sup>2△</sup>, 邵思惠<sup>3</sup>, 张健慧<sup>3</sup>, 杜联芳<sup>3</sup>, 李朝军<sup>3\*</sup>

1. 上海交通大学附属上海市第一人民医院超声心动图室, 上海 200080
2. 阜阳市肿瘤医院超声科, 阜阳 236000
3. 上海交通大学附属上海市第一人民医院超声医学科, 上海 200080

**[摘要]** **目的** 应用超声剪切波频散 (USWD) 技术检测颈动脉黏弹性, 探讨其与血流动力学的相关性。**方法** 招募既往无心脑血管事件病史志愿者 45 例, 依据年龄中位数分为高年龄组 ( $\geq 50$  岁,  $n=23$ ) 和低年龄组 ( $< 50$  岁,  $n=22$ )。采用 USWD 技术检测受试者颈总动脉, 获取颈总动脉剪切波弹性指标动脉壁剪切波弹性模量 ( $SWE_R$ ) 值和剪切波黏性指标动脉壁剪切波频散 ( $SWD_R$ ) 值; 用多普勒超声获取颈总动脉血流动力学参数 [速度时间积分 (VTI)、收缩期峰值流速 (PSV)、舒张末期流速 (EDV) 和平均流速 (MFV)]。采用 Pearson 相关分析分析  $SWE_R$  和  $SWD_R$  与血流动力学参数的关系。**结果** 与低年龄组比较, 高年龄组受试者颈总动脉  $SWE_R$  和  $SWD_R$  均减小 ( $P$  均  $< 0.05$ )。高年龄组受试者颈总动脉 VTI、PSV、EDV 和 MFV 均小于低年龄组 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ )。颈总动脉剪切波弹性指标  $SWE_R$  与血流动力学参数 VTI、PSV、EDV 和 MFV 呈正相关 ( $r=0.354$ 、 $0.400$ 、 $0.467$  和  $0.310$ ;  $P < 0.01$ ,  $P < 0.05$ ); 剪切波黏性指标  $SWD_R$  与 VTI 和 PSV 呈负相关, 而与 MFV 呈正相关 ( $r=-0.481$ 、 $-0.522$  和  $0.352$ ,  $P$  均  $< 0.01$ )。**结论** USWD 技术可鉴别颈动脉黏弹性指标的变化, 这种变化与血流动力学改变有关。

**[关键词]** 超声检查; 剪切波频散; 颈动脉; 血流动力学; 黏弹性

**[中图分类号]** R 543.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)11-1197-06

### Correlation between carotid viscoelasticity and hemodynamics based on ultrasound shear wave dispersion imaging

LUO Xiang-hong<sup>1△</sup>, YAN Min<sup>2△</sup>, SHAO Si-hui<sup>3</sup>, ZHANG Jian-hui<sup>3</sup>, DU Lian-fang<sup>3</sup>, LI Zhao-jun<sup>3\*</sup>

1. Department of Echocardiography, Shanghai General Hospital, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200080, China
2. Department of Ultrasound, Fuyang Cancer Hospital, Fuyang 236000, Anhui, China
3. Department of Ultrasound, Shanghai General Hospital, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200080, China

**[Abstract]** **Objective** To measure the carotid viscoelasticity using ultrasound shear wave dispersion (USWD), and to explore the correlation between the viscoelasticity and hemodynamics. **Methods** Forty-five volunteers without history of cardiovascular and cerebrovascular events were recruited and divided into elder group ( $\geq 50$  years old,  $n=23$ ) and younger group ( $< 50$  years old,  $n=22$ ) according to the median age. The common carotid arteries were detected by USWD, and  $SWE_R$  (elastic index) and  $SWD_R$  (viscous index) were obtained. Hemodynamic parameters, including velocity time integral (VTI), peak systolic velocity (PSV), end-diastolic velocity (EDV), and mean flow velocity (MFV), were measured using Doppler ultrasound. Correlations between  $SWE_R$ ,  $SWD_R$  and hemodynamic parameters were analyzed using Pearson analysis. **Results** The  $SWE_R$ ,  $SWD_R$ , VTI, PSV, EDV and MFV in the elder group were significantly lower than those in the younger group ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ). The  $SWE_R$  was positively correlated with VTI, PSV, EDV and MFV ( $r=0.354$ ,  $0.400$ ,  $0.467$

**[收稿日期]** 2019-03-02 **[接受日期]** 2019-06-23

**[基金项目]** 促进市级医院临床技能与临床创新能力三年行动计划(16CR3105B), 上海市松江区科技攻关项目(18sjkjgg72, 18sjkjgg53), 上海交通大学医工交叉研究基金(YG2015MS28), 上海市科学技术委员会医学引导类科技项目(16411969300), 上海市卫生和计划生育委员会基金(201640043)。Supported by Three-year Plan for Clinical Skills and Innovation in Municipal Hospitals (16CR3105B), Science and Technology Project of Shanghai Songjiang District (18sjkjgg72, 18sjkjgg53), Medicine-Engineering Interdisciplinary Research Fund of Shanghai Jiao Tong University (YG2015MS28), Medical Guiding Project of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (16411969300), and Project of Shanghai Municipal Commission of Health and Family Planning (201640043)。

**[作者简介]** 罗向红, 博士, 副主任医师。E-mail: lxx\_20050703@sina.com; 闫敏, 住院医师。E-mail: 27424062@qq.com

<sup>△</sup>共同第一作者(Co-first authors)。

<sup>\*</sup>通信作者(Corresponding author)。Tel: 021-63240090, E-mail: lzj\_1975@sina.com

and 0.310;  $P < 0.01$ ,  $P < 0.05$ ). The  $SWD_R$  was negatively correlated with VTI and PSV ( $r = -0.481$  and  $-0.522$ , both  $P < 0.01$ ), but positively correlated with MFV ( $r = 0.352$ ,  $P < 0.01$ ). **Conclusion** USWD may identify the change of carotid viscoelasticity, and the change of viscoelasticity is related to hemodynamics.

**[Key words]** ultrasonography; shear wave dispersion; carotid arteries; hemodynamics; viscoelasticity

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(11): 1197-1202]

动脉僵硬是心脑血管事件的重要致病因素, 早期评估意义重大。颈动脉僵硬度的评估方法较多, 如血管回声跟踪技术 (echo-tracking, ET)<sup>[1]</sup>、超声射频动脉硬化定量分析技术 (quality arterial stiffness, QAS)<sup>[2]</sup> 和超声剪切波弹性成像 (shear wave elastography, SWE)<sup>[3]</sup>, 这些方法均是把动脉的黏弹性特性简化为纯弹性模型, 存在一定的局限性。既往研究发现, 黏性组织的剪切波速度随脉冲波频率增大而增大, 该现象称为剪切波频散 (shear wave dispersion, SWD), 其可用于评估组织黏性系数<sup>[4]</sup>。新近, 超声剪切波频散 (ultrasound shear wave dispersion, USWD) 技术可无创检测组织 SWD, 有望评估颈动脉黏性。目前, 采用 USWD 评估颈动脉黏性特征的研究尚未见报道。本研究拟应用 USWD 技术检测志愿者颈动脉的黏弹性指标, 探讨 USWD 技术评估颈动脉黏弹性的可行性, 揭示颈动脉黏弹性与血流动力学参数的相关性。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究对象

本研究属于“SWERT 评价脑梗死患者心脑血管耦联及 APP 终端预警系统构建”项目的一部分, 该项目经上海交通大学附属上海市第一人民医院伦理委员会批准 (批号: 2017KY009), 并已在中国临床试验注册中心官网注册 (注册号: ChiCTR1800016590)。纳入标准: (1) 2018年12月至2019年1月于上海交通大学附属上海市第一人民医院甲乳外科或普外科住院的患者, 既往无心脑血管事件病史; (2) 颈动脉剪切波黏弹性指标和一般资料完整; (3) 同意参加本研究并签署知情同意书。排除标准: (1) 既往有心脑血管事件发生病史; (2) 既往有四肢血管疾病; (3) 近期有活动性出血史或罹患免疫性疾病, 或伴严重肝、肺、肾疾病, 恶性肿瘤及血液病。最终招募志愿者 45 例, 男 23 例、女

22 例, 年龄 20~80 岁, 平均年龄为 (48.9±9.7) 岁, 依据年龄中位数分为高年龄组 (≥50岁) 和低年龄组 (<50岁)。所有志愿者在检查当天停用降压药, 24 h 内禁止吸烟、饮酒或咖啡, 入选者均签署知情同意书。受试者采用电子问卷, 收集受试者身高、体质量等, 并计数体质量指数。平静状态下测量肱动脉收缩压和舒张压 3 次, 取平均值。

### 1.2 仪器与方法

颈总动脉脉搏波传导速度 (pulse wave velocity, PWV) 及血流动力学参数检测<sup>[5]</sup>。使用百胜 MyLab Twice 彩色多普勒超声诊断仪, 探头 LA523, 频率 4~13 MHz; 内置 QAS 软件。选取双侧颈总动脉窦部下缘 1.0 cm 处为检查部位。行标准的颈动脉检查后, 启动 QAS 功能, 获取双侧颈动脉僵硬度的参考指标 PWV 和 4 个血流动力学参数: 速度时间积分 (velocity time integral, VTI)、收缩期峰值流速 (peak systolic velocity, PSV)、舒张末期流速 (end-diastolic velocity, EDV) 和平均流速 (mean flow velocity, MFV), 并计算两侧平均值。

颈总动脉剪切波黏弹性评估方法<sup>[6]</sup>。使用 Canon Aplio i900 型实时剪切波弹性超声诊断仪, 腹部探头, 频率 1~8 MHz (中心频率 5 MHz)。双侧颈总动脉黏弹性感兴趣区与上述弹性评估的参考技术相同。嘱患者屏气, 分别按下“TCS”和“QuadView”键启用黏弹性四屏评估模式, 同步记录心电图, 存储 10~20 个心动周期的动态图像 (图 1)。回放动态图像, 依据心电图 R 波顶点确定颈总动脉时相。按“measurement”键启动黏弹性测量, 设置测量感兴趣区为圆形, 直径为 1 mm, 获取剪切波弹性模量 ( $SWE_R$ ) 值和黏性指标剪切波频散 ( $SWD_R$ ) 值。于一侧颈总动脉近壁和远壁各取 5 个感兴趣区 (每个感兴趣区间隔 1~2 mm), 系统自动计算 10 个壁感兴趣区的  $SWE_R$  和  $SWD_R$  的平均值。最终, 计算两侧颈总动脉壁  $SWE_R$  平均值和  $SWD_R$  平均值用于分析。

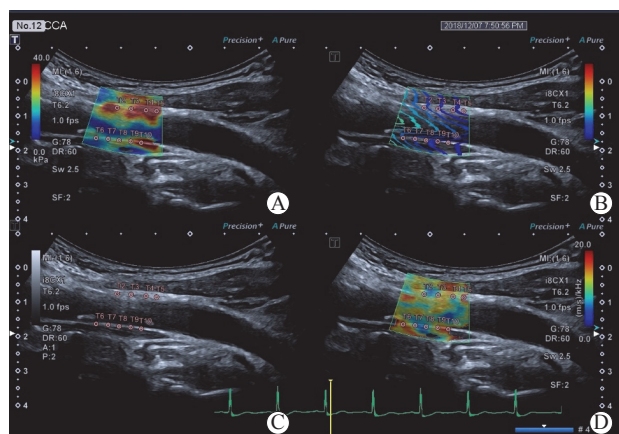


图 1 USWD 技术评估颈总动脉黏弹性四屏对比图

Fig 1 Quadview display of USWD for evaluation of common carotid viscoelasticity

A: SWE image. The scale of elasticity modulus was 0.0–40.0 kPa. The blue areas corresponded to the low elasticity modulus (soft) and red areas on the elastogram corresponded to the high elasticity modulus (stiff). B: Shear wave propagation image. The color curves represented shear wave arrival time contours. C: Ultrasonic two-dimensional image. D: SWD color image. The scale of SWD value between 0.0–100.0  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kHz}^{-1}$ . The blue areas corresponded to the low SWD value and red areas corresponded to the high SWD value. USWD: Ultrasound shear wave dispersion; SWE: Shear wave elasticity; SWD: Shear wave dispersion

1.3 统计学处理 应用 SPSS 13.0 软件进行统计学分析。计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示, 两组间计量资料的比较采用独立样本  $t$  检验; 率的比较采用  $\chi^2$  检验; 重复性比较采用 Bland-Altman 分析法; 相关性分析采用线性相关分析和 Pearson 相关分析。检验水准 ( $\alpha$ ) 为 0.05。

## 2 结果

2.1 一般资料比较 两组受试者的身高、收缩压、舒张压差异均有统计学意义 ( $P$  均  $< 0.05$ )。体质量和体质量指数在两组间的差异均无统计学意义 ( $P$  均  $> 0.05$ )。见表 1。

2.2 两组颈总动脉黏弹性指标与血流动力学参数比较 与低年龄组比较, 高年龄组受试者颈总动脉剪切波弹性指标  $\text{SWE}_R$  和黏性指标  $\text{SWD}_R$  均减小 ( $P$  均  $< 0.05$ )。高年龄组受试者颈总动脉 4 个血流动力学指标 VTI、PSV、EDV 和 MFV 均小于低年龄组 ( $P$  均  $< 0.01$ )。低年龄组颈动脉僵硬程度参数 PWV 小于高年龄组, 差异有统计学意义 ( $P < 0.01$ )。见表 2。

表 1 受试者一般资料

Tab 1 General information of subjects

Item	Elder group <sup>a</sup> $N=23$	Younger group <sup>b</sup> $N=22$	$t/\chi^2$ value	$P$ value
Female/male $n$	11/12	11/11	0.023	0.879
Age (year), $\bar{x} \pm s$	65.9 $\pm$ 9.5	31.1 $\pm$ 9.8	13.673	$< 0.01$
Height $h/\text{cm}$ , $\bar{x} \pm s$	162.9 $\pm$ 7.1	167.5 $\pm$ 7.9	-2.301	0.025
Body mass $m/\text{kg}$ , $\bar{x} \pm s$	68.3 $\pm$ 17.3	66.7 $\pm$ 15.6	0.348	0.729
BMI ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ), $\bar{x} \pm s$	25.8 $\pm$ 7.4	23.5 $\pm$ 4.1	1.444	0.154
SBP $p/\text{mmHg}$ , $\bar{x} \pm s$	139.6 $\pm$ 11.1	125.7 $\pm$ 9.1	5.102	$< 0.01$
DBP $p/\text{mmHg}$ , $\bar{x} \pm s$	87.9 $\pm$ 7.2	79.7 $\pm$ 6.1	4.607	$< 0.01$

<sup>a</sup>: Age  $\geq 50$  years; <sup>b</sup>: Age  $< 50$  years. 1 mmHg = 0.133 kPa. BMI: Body mass index; SBP: Systolic blood pressure; DBP: Diastolic blood pressure

表 2 两组颈总动脉黏弹性指标与血流动力学参数比较

Tab 2 Comparison of common carotid viscoelastic and hemodynamic parameters between two groups

Item	Elder group <sup>a</sup> $n=23$	Younger group <sup>b</sup> $n=22$	$t$ value	$P$ value
$\text{SWE}_R$ $p/\text{kPa}$	10.29 $\pm$ 9.57	17.24 $\pm$ 14.07	-2.236	0.040
$\text{SWD}_R$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kHz}^{-1}$ )	11.99 $\pm$ 3.51	13.97 $\pm$ 3.71	-2.129	0.043
PWV $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	8.67 $\pm$ 2.13	5.47 $\pm$ 0.70	7.425	$< 0.01$
VTI (m)	0.19 $\pm$ 0.06	0.27 $\pm$ 0.10	-3.994	$< 0.01$
PSV $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	44.23 $\pm$ 13.24	72.49 $\pm$ 21.44	-5.876	$< 0.01$
EDV $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	13.81 $\pm$ 8.36	19.07 $\pm$ 4.17	-2.891	0.006
MFV $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	21.53 $\pm$ 7.17	32.65 $\pm$ 7.13	-5.710	$< 0.01$

<sup>a</sup>: Age  $\geq 50$  years; <sup>b</sup>: Age  $< 50$  years.  $\text{SWE}_R$ : Shear wave elastography at the R wave of the electrocardiogram;  $\text{SWD}_R$ : Shear wave dispersion at the R wave of the electrocardiogram; PWV: Pulse wave velocity; VTI: Velocity time integral; PSV: Peak systolic velocity; EDV: End-diastolic velocity; MFV: Mean flow velocity



2.3 两组颈总动脉黏弹性指标与血流动力学参数的相关性分析 所有受试者的颈总动脉剪切波弹性指标  $SWE_R$  与血流动力学参数 VTI、PSV、EDV 和 MFV 均呈正相关 ( $r=0.354$ 、 $0.400$ 、 $0.467$  和  $0.310$ ;  $P<0.01$ ,  $P<0.05$ )。高年龄组的  $SWE_R$  仅与 EDV 呈正相关 ( $r=0.423$ ,  $P<0.05$ )。所有受试者的剪切波黏性指

标  $SWD_R$  与 VTI 和 PSV 呈负相关 ( $r=-0.481$ 、 $-0.522$ ,  $P$  均  $<0.01$ )，而与 MFV 呈正相关 ( $r=0.352$ ,  $P<0.01$ )；高年龄组  $SWD_R$  与 PSV 呈负相关 ( $r=-0.369$ ,  $P<0.05$ )，而低年龄组  $SWD_R$  与 VTI 和 PSV 呈负相关 ( $r=-0.438$ 、 $-0.509$ ;  $P<0.05$ ,  $P<0.01$ )，与 MFV 呈正相关 ( $r=0.475$ ,  $P<0.05$ )。见表 3。

表 3 颈总动脉黏弹性指标与血流动力学参数的相关性分析

Tab 3 Correlation analysis between common carotid viscoelastic and hemodynamic parameters

Parameter	$SWE_R$			$SWD_R$		
	All subjects	Elder group <sup>a</sup>	Younger group <sup>b</sup>	All subjects	Elder group <sup>a</sup>	Younger group <sup>b</sup>
VTI	0.354**	0.171	0.353*	-0.481**	-0.308	-0.438*
PSV	0.400**	0.056	0.281*	-0.522**	-0.369*	-0.509**
EDV	0.467**	0.423*	0.409*	0.198	0.025	0.248
MFV	0.310*	0.189	0.470*	0.352**	0.201	0.475*

<sup>a</sup>: Age  $\geq 50$  years; <sup>b</sup>: Age  $< 50$  years.  $SWE_R$ : Shear wave elastography at the R wave of the electrocardiogram;  $SWD_R$ : Shear wave dispersion at the R wave of the electrocardiogram; VTI: Velocity time integral; PSV: Peak systolic velocity; EDV: End-diastolic velocity; MFV: Mean flow velocity. \* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$

2.4 重复性检验 随机抽取 22 例受试者重复测量颈动脉剪切波黏性指标  $SWD_R$ ，行重复性检验。重复测量具有较高的一致性 ( $r=0.637$ ,  $P<0.01$ )。

Bland-Altman 分析显示  $SWD_R$  2 次测量值的差值与平均值呈一致性的变化趋势 (图 2)。

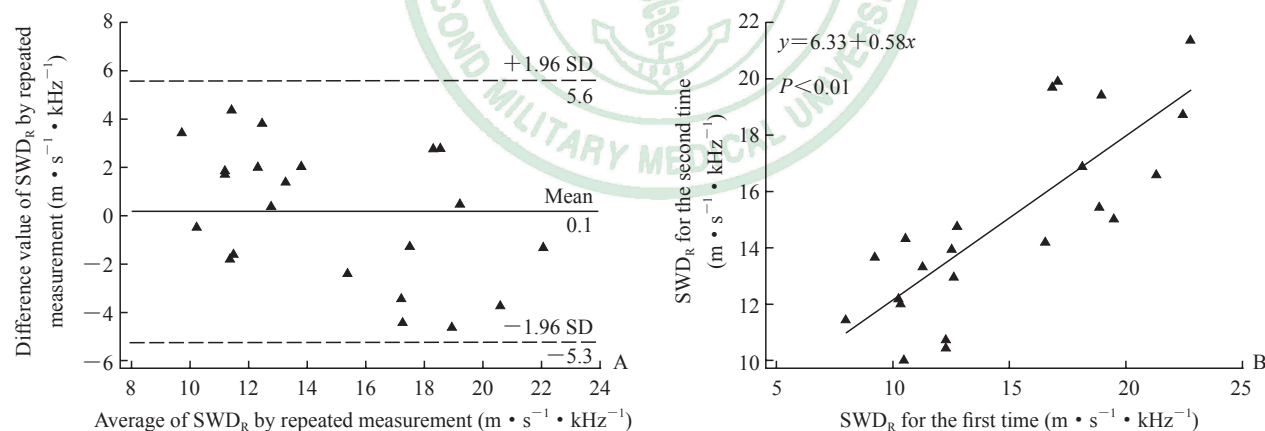


图 2 应用 Bland-Altman 分析 (A) 和线性回归 (B) 行  $SWD_R$  组内一致性检验

Fig 2 Intragroup repeatability of  $SWD_R$  was analyzed by Bland-Altman (A) and linear correlation analysis (B)

$SWD_R$ : Shear wave dispersion at the R wave of the electrocardiogram; SD: Standard deviation

### 3 讨论

当血液在动脉中流动时，动脉壁会承受到血液流动压力的作用而发生位移形变，形变后的动脉壁会产生回弹力作用于血液，二者作用力相互耦合称为液固耦合<sup>[7]</sup>。动脉壁黏弹性特性与液固耦合效应密切相关，是动脉生物力学研究的热点，其

无创评估也是难点。本研究首次采用 USWD 技术无创评估动脉壁的黏弹性。结果表明，高年龄组受试者颈总动脉壁剪切波弹性指标  $SWE_R$  和黏性指标  $SWD_R$  均低于年轻组受试者，减低的黏弹性指标与血流动力学的 4 个参数 VTI、PSV、EDV、MFV 密切相关，提示 USWD 可无创评估颈动脉的黏弹性，有望为研究动脉液固耦合效应提供潜在手段。

颈动脉壁为黏弹性组织, 生物力学表现为非线性黏弹性特性<sup>[8]</sup>。超声剪切波速度是评估组织黏弹性的主要指标, 与频率的关系是鉴别弹性和黏弹性的重要依据<sup>[9]</sup>。在弹性组织中, 剪切波速度与频率变化无关; 在黏弹性组织中, 剪切波速度随频率的增大而增大, 二者关系曲线的斜率称为 SWD, 它与组织黏性系数密切相关, 可间接反映组织黏性<sup>[9]</sup>。本研究首次采用 USWD 技术评估人颈动脉黏弹性, 结果发现高年龄受试者颈总动脉黏弹性指标均低于年轻者, 提示高年龄受试者颈动脉的黏弹性减弱而刚性增加。为验证 USWD 技术评估颈动脉僵硬度的准确性, 本研究采用 PWV 对照, 结果也提示高年龄组受试者颈动脉僵硬增加。动脉僵硬与动脉壁的胶原纤维、弹性纤维和平滑肌细胞的含量、比例和空间构型有关<sup>[10]</sup>。弹性纤维主要表现为弹性特性, 并在载荷作用下具有一定的延伸能力。胶原纤维具有一定的强度和刚度, 存在应变滞后和应力松弛现象, 主要表现为黏性特性<sup>[10]</sup>。随着年龄的增长, 颈动脉壁的部分弹力层发生断裂、崩解, 弹性纤维含量降低而胶原纤维增生, 应力松弛减慢, 蠕变程度减低, 其生物力学的黏弹性特性发生改变, 导致动脉僵硬增加<sup>[11]</sup>。因此, 有学者认为颈动脉黏弹性改变可能与年龄或动脉疾患有关<sup>[12]</sup>。

动脉僵硬可影响血流动力学改变<sup>[13]</sup>。血流作用于血管壁产生壁面剪切力, 血管壁滞止黏性血液形成层流和粒子滞留<sup>[14]</sup>。动脉的液固耦合生物力学分析证实, 动脉壁为刚性(弹性无限大)时血流速度快, 壁面剪切力大, 层流薄, 层流内的粒子滞留时间短; 动脉壁为黏弹性时血流速度低, 壁面剪切力小, 层流厚, 粒子滞留时间长<sup>[14]</sup>。这是因为流动的血液作用于管壁使其发生形变, 血液流体域变大, 血流速度减小, 反之亦然。但是, 本研究结果不支持该观点, 本研究结果显示高年龄组受试者颈动脉 4 个血流动力学参数均低于年轻组受试者。这是因为在液固耦合分析时, 一般设定流量和流阻等因素不变, 观察管壁对流体动力学的影响。而在人体中, 老年人的心功能可能也发生了改变<sup>[15]</sup>。另外, 血管形状改变会使层流变为湍流, 促进粒子滞留, 使脂质和血小板积聚、沉积在动脉内壁导致动脉硬化<sup>[16]</sup>。例如, 在颈动脉窦部, 红细胞的流动偏向分叉的内侧壁, 分叉外侧壁的氧弥散下降, 血管内皮细胞缺血缺氧, 诱发动脉壁的炎症反应<sup>[17]</sup>。

血流动力学亦可影响动脉僵硬。血流动力学因素包括血流速度、压力、流动分离、二次流、壁面剪切力、粒子滞留时间等<sup>[18-19]</sup>。研究表明, 低壁面剪切力通过血流介导可导致内皮细胞功能不全, 诱导内皮细胞分泌一氧化氮和使血小板源性生长因子分泌减少, 从而抑制血管平滑肌细胞蛋白的合成, 促进其凋亡增加, 最终导致动脉硬化<sup>[20]</sup>。而壁面剪切力过高, 可引起血管内中膜增厚导致动脉硬化病变<sup>[21]</sup>。总之, 动脉黏弹性可影响血流动力学改变, 同时血流动力学又反作用于动脉壁, 形成液固耦合效应导致动脉疾病。

本研究还存在一定的局限性: 样本量相对较小, 研究中选择的志愿者既往无心脑血管事件病史, 对于心脑血管疾病患者颈动脉壁黏弹性如何变化尚不清楚; 本研究采用凸阵探头检测颈动脉, 测量精度存在一定误差。

综上所述, 本研究采用 USWD 技术评估既往无心脑血管事件病史的志愿者颈动脉壁黏弹性, 结果发现高年龄者颈总动脉壁黏弹性指标值均减低, 减低的黏弹性指标与血流动力学参数 VTI、PSV、EDV 和 MFV 密切相关。USWD 技术可评估动脉壁黏弹性, 为临床研究动脉疾病提供了新的视角和手段。

#### [参 考 文 献]

- [1] PUTAREK K, BANFIC L, PASALIC M, KRNIC N, SPEHAR UROIC A, ROJNIC PUTAREK N. Arterial stiffness as a measure of cardiovascular risk in obese adolescents and adolescents with diabetes type 1[J]. *J Pediatr Endocrinol Metab*, 2018, 31: 1315-1323.
- [2] LI Z J, LIU Y, DU L F, LUO X H. Evaluating arterial stiffness in type 2 diabetes patients using ultrasonic radiofrequency[J]. *J Huazhong Univ Sci Technol (Med Sci)*, 2016, 36: 442-448.
- [3] LI Z, DU L, WANG F, LUO X. Assessment of the arterial stiffness in patients with acute ischemic stroke using longitudinal elasticity modulus measurements obtained with shear wave elastography[J]. *Med Ultrason*, 2016, 18: 182-189.
- [4] ALMEIDA T W, SAMPAIO D R, BRUNO A C, PAVAN T Z, CARNEIRO A A. Comparison between shear wave dispersion magneto motive ultrasound and transient elastography for measuring tissue-mimicking phantom viscoelasticity[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2015, 62: 2138-2145.
- [5] 李朝军, 李凡, 秦燕, 张茜, 高峰, 杜联芳, 等. 移植肾后

- 颈总动脉形态及其衰老进程[J]. 复旦学报(医学版), 2017,44:261-266.
- [6] 李朝军,金琳,王枫,邵春娟,唐金华,伍瑛,等. 实时剪切波弹性成像评价急性缺血性脑梗死患者颈动脉僵硬度参数的临床研究[J]. 临床超声医学杂志,2016,18:149-152.
- [7] WANG Z, WOOD N B, XU X Y. A viscoelastic fluid-structure interaction model for carotid arteries under pulsatile flow[J/OL]. *Int J Numer Method Biomed Eng*, 2015, 31: e02709. doi: 10.1002/cnm.2709.
- [8] FERRUZZI J, BERSI M R, MECHAM R P, RAMIREZ F, YANAGISAWA H, TELLIDES G, et al. Loss of elastic fiber integrity compromises common carotid artery function: implications for vascular aging[J]. *Artery Res*, 2016, 14: 41-52.
- [9] GHIGO A R, WANG X F, ARMENTANO R, FULLANA J M, LAGRÉE P Y. Linear and nonlinear viscoelastic arterial wall models: application on animals[J/OL]. *J Biomech Eng*, 2017, 139: 011003. doi: 10.1115/1.4034832.
- [10] OSIDAK M S, OSIDAK E O, AKHMANOVA M A, DOMOGATSKY S P, DOMOGATSKAYA A S. Fibrillar, fibril-associated and basement membrane collagens of the arterial wall: architecture, elasticity and remodeling under stress[J]. *Curr Pharm Des*, 2015, 21: 1124-1133.
- [11] KHAMDAENG T, LUO J, VAPPOU J, TERDTON P, KONOFAGOU E E. Arterial stiffness identification of the human carotid artery using the stress-strain relationship *in vivo* [J]. *Ultrasonics*, 2012, 52: 402-411.
- [12] WENDORFF C, WENDORFF H, KUEHNLE A, TSANTILAS P, KALLMAYER M, ECKSTEIN H H, et al. Impact of sex and age on carotid plaque instability in asymptomatic patients—results from the Munich Vascular Biobank[J]. *Vasa*, 2016, 45: 411-416.
- [13] HASHIMOTO J. Central hemodynamics for management of arteriosclerotic diseases[J]. *J Atheroscler Thromb*, 2017, 24: 765-778.
- [14] YAKHSHI-TAFTI E, TAFAZZOLI-SHADPOUR M, ALAVI S H, MOJRA A. Coupled fluid-wall modelling of steady flow in stenotic carotid arteries[J]. *J Med Eng Technol*, 2009, 33: 544-550.
- [15] KELLER K M, HOWLETT S E. Sex differences in the biology and pathology of the aging heart[J]. *Can J Cardiol*, 2016, 32: 1065-1073.
- [16] PETRINI J, RING M, FRANCO-CERECEDA A, CAIDAHL K, ERIKSSON M J. Aortic versus carotid intima-media thickness and impact of aortic valve disease[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2018, 38: 895-902.
- [17] FERNS G A A, HEIKAL L. Hypoxia in atherogenesis[J]. *Angiology*, 2017, 68: 472-493.
- [18] ESHTEHARDI P, BROWN A J, BHARGAVA A, COSTOPOULOS C, HUNG O Y, CORBAN M T, et al. High wall shear stress and high-risk plaque: an emerging concept[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2017, 33: 1089-1099.
- [19] CANTEY E P, WILKINS J T. Discordance between lipoprotein particle number and cholesterol content: an update[J]. *Curr Opin Endocrinol Diabetes Obes*, 2018, 25: 130-136.
- [20] MOHAMIED Y, SHERWIN S J, WEINBERG P D. Understanding the fluid mechanics behind transverse wall shear stress[J]. *J Biomech*, 2017, 50: 102-109.
- [21] KANG C. Using ultrasound radio frequency technology to assess regression of the structure and function of the carotid artery by radioiodine therapy in hyperthyroidism patients[J]. *Arch Med Sci*, 2015, 11: 1236-1243.

[本文编辑] 商素芳