

本文引用: 刘媛媛, 李佳淇, 杨茜, 等. 剪切波弹性成像技术定量评价合并高脂血症的2型糖尿病患者颈动脉弹性[J]. 中国动脉硬化杂志, 2026, 34(3): 232-238. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2026.03.006.

· 临床研究 ·

[文章编号] 1007-3949(2026)34-03-0232-07

## 剪切波弹性成像技术定量评价合并高脂血症的 2型糖尿病患者颈动脉弹性

刘媛媛, 李佳淇, 杨茜, 王许, 吕丹, 马雪美惠, 礼广森

大连医科大学附属第二医院超声科, 辽宁省大连市 116027

**[摘要]** **[目的]** 应用剪切波弹性成像(SWE)技术定量评价合并高脂血症的2型糖尿病(T2DM)患者颈动脉弹性。**[方法]** 本研究纳入112例T2DM患者,根据是否合并高脂血症将其分为单纯糖尿病组( $n=52$ )和合并高脂血症组( $n=60$ ),同时选择健康体检者作为对照组( $n=55$ )。收集各组的一般资料和生物化学指标。常规超声测量左侧颈总动脉内膜中膜厚度(IMT)、收缩期峰值血流速度(PSV)、收缩期末内径(Ds)及舒张期末内径(Dd),并计算管壁运动度( $\Delta D$ )和僵硬系数( $\beta$ )。应用SWE测量左侧颈总动脉弹性模量最大值的均值( $ME_{max}$ )、平均值的均值( $ME_{mean}$ )及最小值的均值( $ME_{min}$ )。**[结果]** 单纯糖尿病组、合并高脂血症组空腹血糖(FBG)、糖化血红蛋白(HbA1c)、总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)及低密度脂蛋白胆固醇(LDL)水平显著高于对照组,高密度脂蛋白胆固醇(HDL)水平显著低于对照组(均 $P<0.05$ );合并高脂血症组TC、TG及LDL水平显著高于单纯糖尿病组, HDL水平显著低于单纯糖尿病组(均 $P<0.05$ )。单纯糖尿病组、合并高脂血症组SWE参数( $ME_{max}$ 、 $ME_{mean}$ 及 $ME_{min}$ )显著高于对照组(均 $P<0.05$ ),合并高脂血症组SWE参数均显著高于单纯糖尿病组(均 $P<0.05$ )。Pearson相关分析显示,IMT、TC、TG、LDL、FBG及HbA1c与SWE参数呈正相关, HDL与SWE参数呈负相关(均 $P<0.05$ )。多元线性回归分析表明,2型糖尿病和高脂血症是颈动脉SWE参数的独立危险因素( $P<0.05$ )。**[结论]** 高脂血症与T2DM患者颈动脉弹性的恶化显著相关,SWE技术能定量评估合并高脂血症的T2DM患者颈动脉弹性。

**[关键词]** 剪切波弹性成像; 高脂血症; 2型糖尿病; 颈动脉弹性

**[中图分类号]** R5;R445

**[文献标识码]** A

### Quantitative evaluation of carotid artery stiffness in patients with type 2 diabetes mellitus complicated by hyperlipidemia using shear wave elastography

LIU Yuanyuan, LI Jiaqi, YANG Xi, WANG Xu, LÜ Dan, MA Xuemeihui, LI Guangsen

Department of Ultrasound, the Second Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian, Liaoning 116027, China

**[ABSTRACT]** **Aim** To quantitatively evaluate carotid artery stiffness in patients with type 2 diabetes mellitus (T2DM) complicated by hyperlipidemia using shear wave elastography (SWE). **Methods** 112 T2DM patients were included in this study. They were divided into simple diabetes group ( $n=52$ ) and hyperlipidemia group ( $n=60$ ) according to whether they were combined with hyperlipidemia. At the same time, healthy people were selected as the control group ( $n=55$ ). General data and biochemical indices were collected for each group. Conventional ultrasound was used to measure the intima-media thickness (IMT), peak systolic velocity (PSV), systolic diameter (Ds) and diastolic diameter (Dd) of the left common carotid artery, and the wall motion amplitude ( $\Delta D$ ) and stiffness coefficient ( $\beta$ ) were calculated. SWE was applied to measure the mean of the maximum modulus ( $ME_{max}$ ), the mean of mean elastic modulus ( $ME_{mean}$ ) and the mean of minimum modulus ( $ME_{min}$ ) of the left common carotid artery. **Results** The levels of fasting blood glucose (FBG), glycosylated hemoglobin (HbA1c), total cholesterol (TC), triglyceride (TG) and low density lipoprotein cholesterol (LDL) in the simple diabetes group and the hyperlipidemia group were significantly higher than those in the control group, while the levels of high density lipoprotein cholesterol (HDL) were significantly lower than those in the control group (all  $P<0.05$ ); The levels of TC, TG and LDL in the hyperlipidemia group were significantly

**[收稿日期]** 2025-10-10

**[修回日期]** 2025-11-25

**[作者简介]** 刘媛媛, 硕士研究生, 住院医师, 研究方向为心血管超声, E-mail: 18773671158@163.com。通信作者礼广森, 博士, 主任医师, 研究方向为心血管超声, E-mail: liguangsen009@163.com。

higher than those in the simple diabetes group, and the HDLC levels were significantly lower than those in the simple diabetes group (all  $P < 0.05$ ). SWE parameters ( $ME_{max}$ ,  $ME_{mean}$  and  $ME_{min}$ ) in the simple diabetes group and the hyperlipidemia group were significantly higher than those in the control group (all  $P < 0.05$ ), and SWE parameters in the hyperlipidemia group were significantly higher than those in the simple diabetes group (all  $P < 0.05$ ). Pearson correlation analysis showed that IMT, TC, TG, LDLC, FBG and HbA1c were positively correlated with SWE parameters (all  $P < 0.05$ ), while HDLC was negatively correlated with SWE parameters (all  $P < 0.05$ ). Multivariable linear regression analysis indicated that T2DM and hyperlipidemia were independent risk factors for carotid SWE parameters (both  $P < 0.05$ ). **Conclusion** Hyperlipidemia is significantly correlated with deterioration of carotid elasticity in T2DM patients, and SWE technology can quantitatively evaluate carotid elasticity in T2DM patients complicated with hyperlipidemia.

[KEY WORDS] shear wave elastography; hyperlipidemia; type 2 diabetes mellitus; carotid artery stiffness

2 型糖尿病 (type 2 diabetes mellitus, T2DM) 是一种以血糖水平异常升高为特征的慢性代谢性疾病。高血糖状态下,葡萄糖代谢途径易产生过量不良副产物,尤其是山梨糖醇通路过度激活,会使醛糖还原酶的活性及含量升高,进而引发广泛的氧化应激与炎症反应,最终对心血管系统造成损伤<sup>[1-2]</sup>。高脂血症通常指血浆中甘油三酯和/或总胆固醇水平升高的状态。根据美国糖尿病协会数据,T2DM 合并高脂血症的比例高达 60% ~ 70%<sup>[3]</sup>。脂质代谢异常是动脉粥样硬化的重要危险因素,这一观点已获得广泛的证据支持<sup>[4]</sup>。T2DM 与脂质代谢异常通过多重病理生理机制产生协同作用,共同促进动脉粥样硬化的发生发展<sup>[5]</sup>。因此,定量评估合并高脂血症的 T2DM 患者颈动脉弹性,对心血管疾病的诊断与预防具有重要意义。

剪切波弹性成像 (shear wave elastography, SWE) 是一种新兴的超声技术,可直接、实时、无创地反映动脉血管的纵向弹性,定量分析组织弹性的绝对值,从而评估颈动脉弹性的变化<sup>[6]</sup>。本研究旨在应用 SWE 定量评价高脂血症对 T2DM 患者颈动脉弹性的影响,通过定量手段评估动脉粥样硬化的程度。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究对象

选择 2024 年 3 月—2025 年 3 月期间在我院接受治疗的 112 例 T2DM 患者作为研究对象。根据是否合并高脂血症分为两组:单纯糖尿病组 52 例,其中男性 27 例,女性 25 例,平均病程 (45.0 ± 6.8) 个月;合并高脂血症组 60 例,其中男性 30 例,女性 30 例,平均病程 (46.8 ± 6.6) 个月。此外,选取 55 名健康体检者作为对照组,其中男性 27 例,女性 28 例。纳入标准:①符合《中国糖尿病防治指南(2024 年版)》中 T2DM 的诊断标准<sup>[7]</sup>,高脂血症的诊断标准

为空腹血清总胆固醇水平超过 5.72 mmol/L,或甘油三酯水平超过 1.7 mmol/L<sup>[8]</sup>;②所有入选者均已知晓并同意配合本次试验;③所有入选者左侧颈动脉超声测量区域未见明显斑块形成,即内膜中膜厚度 (intima-media thickness, IMT) ≤ 1.4 mm。排除标准:①既往已明确诊断为心功能不全、颈动脉狭窄、冠心病、高血压、脑卒中等心脑血管疾病的患者;②患有免疫缺陷性疾病、恶性肿瘤等严重疾病的患者;③因其他疾病导致颈动脉弹性改变的患者。本研究已获得大连医科大学附属第二医院医学伦理委员会的批准 (伦理审批号:KY2025-335-01),所有参与者均已充分了解知情同意书内容,并签署了书面知情同意书。

### 1.2 临床资料收集

收集所有入选者的一般资料,包括性别、年龄、病程、体重指数 (body mass index, BMI)、血压、心率、吸烟情况等。收集所有入选者禁食禁水 12 h 后的空腹血糖 (fasting blood glucose, FBG)、糖化血红蛋白 (hemoglobin, HbA1c)、总胆固醇 (total cholesterol, TC)、甘油三酯 (triglyceride, TG)、低密度脂蛋白胆固醇 (low density lipoprotein cholesterol, LDLC)、高密度脂蛋白胆固醇 (high density lipoprotein cholesterol, HDLC) 等生物化学指标,以上生物化学指标均通过全自动生化分析仪完成检测。

### 1.3 常规超声参数测量

采用配备频率为 10 ~ 12 MHz 的 L4-15WU 线阵探头的 Mindray 超声诊断仪,对受试者进行常规颈动脉超声检查。M 型超声于左侧颈总动脉膨大处下方 1.0 ~ 1.5 cm 处测量颈总动脉收缩期末内径 (systolic diameter, Ds) 和舒张期末内径 (diastolic diameter, Dd),二维超声测量颈总动脉 IMT,利用多普勒超声测量收缩期颈总动脉峰值血流速度 (peak systolic velocity, PSV)。以上各参数重复测量 3 次,取平均值。通过以上参数利用计算公式可获得管

壁运动度  $\Delta D$  ( $\Delta D = D_s - D_d$ ) 和管壁的僵硬系数  $\beta$  [ $\beta = \ln(\text{收缩压}/\text{舒张压})/(\Delta D/D_d)$ ]。

#### 1.4 SWE 参数测量

调整深度及增益使得二维图像清楚的显示后,将二维超声模式转换为 SWE 模式,保持探头位于相同位置。在检查过程中,探头轻触皮肤避免加压,受检者取仰卧位,颈部轻度后伸,以保持测量条件一致。嘱咐受检者避免吞咽和咳嗽动作,指导其平静呼吸后屏气,并调整超声探头至颈动脉管壁,内膜中膜显示清晰且彩色编码信号均匀分布于动脉前后管壁时,冻结并储存舒张末期颈动脉图像,重复此操作,保留 3 张显示清晰的图像。切换至超声诊断仪自带的测量功能程序,将测量取样框设置为圆形,直径设置为 1 mm,将取样框移动至颈动脉前壁内膜中膜中央部位,测量路线与颈动脉内膜中膜延续方向相一致,每隔 2 mm 测量 1 次,连续测量 10 次,同一图像反复测量并计算获得杨氏模量平均值、杨氏模量最小值、杨氏模量最大值。最后将 3 张保留图像的杨氏模量值再次取平均值,得到弹性模量最大值的均值 ( $ME_{\max}$ )、弹性模量平均值的均值 ( $ME_{\text{mean}}$ ) 及弹性模量最小值的均值 ( $ME_{\min}$ )。

#### 1.5 重复性检验

从所有受检者中随机抽样 40 名,由两位副主任

医师及以上职称的超声医师(均具有 5 年以上弹性成像超声经验)分别使用同样方法测量受检者左侧颈总动脉弹性参数;7 天之后,这 40 名受检者将由其中一位超声医师重新进行相同测量,以此来计算和分析观察者之间以及观察者内部的相关性系数。

#### 1.6 统计学分析

采用 SPSS 27.0 统计软件进行数据处理及统计分析。定量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,三组间比较采用单因素方差分析,两组间比较采用  $t$  检验。定性资料以例(%)表示,三组间比较采用  $\chi^2$  检验。基于 SWE 参数、IMT 及血脂指标等数据均符合正态分布,采用 Pearson 相关分析评估其相关性。采用多元线性回归分析评估代谢因素与颈动脉 SWE 参数的独立关联,以  $ME_{\max}$ 、 $ME_{\text{mean}}$  和  $ME_{\min}$  作为因变量,是否患 T2DM 和是否合并高脂血症为自变量,同时纳入性别、年龄、吸烟、BMI、收缩压等协变量进行调整。

## 2 结果

### 2.1 一般临床资料比较

三组在性别、年龄、病程、BMI、血压、心率及吸烟史方面差异均无统计学意义(均  $P > 0.05$ ; 表 1)。

表 1. 三组间一般临床资料比较

Table 1. Comparison of general clinical data among the three groups

项目	对照组 ( $n=55$ )	单纯糖尿病组 ( $n=52$ )	合并高脂血症组 ( $n=60$ )	统计值	$P$
男/女/[例(%)]	27(49.1)/28(50.9)	27(51.9)/25(48.1)	30(50.0)/30(50.0)	0.089	0.956
年龄/岁	57.8±7.0	57.8±9.3	56.2±8.5	0.682	0.507
病程/月		45.0±6.8	46.8±6.6	-1.352	0.179
BMI/(kg/m <sup>2</sup> )	24.4±2.8	25.1±3.8	25.3±2.8	1.088	0.339
收缩压/mmHg	114.7±11.4	116.5±11.4	116.6±11.2	0.481	0.619
舒张压/mmHg	71.2±5.3	70.7±5.6	71.8±6.3	0.514	0.599
心率/(次/分)	74.2±4.8	73.5±4.3	74.8±3.7	1.270	0.284
吸烟史/[例(%)]	10(18.2)	12(23.1)	14(23.3)	0.554	0.758

注:空白表示不适用。

### 2.2 生物化学指标比较

单纯糖尿病组、合并高脂血症组 FBG、HbA1c、TC、TG 及 LDLC 水平显著高于对照组, HDLC 水平显著低于对照组(均  $P < 0.05$ ); 合并高脂血症组 TC、TG 及 LDLC 显著高于单纯糖尿病组, HDLC 显著低于单纯糖尿病组(均  $P < 0.05$ ; 表 2)。

### 2.3 常规超声参数比较

单纯糖尿病组、合并高脂血症组 IMT、 $\beta$  显著高

于对照组(均  $P < 0.05$ ); 虽然合并高脂血症组 IMT、 $\beta$  较单纯糖尿病组增高,但差异不具有统计学意义(均  $P > 0.05$ ; 表 3)。

### 2.4 SWE 参数比较

单纯糖尿病组、合并高脂血症组  $ME_{\text{mean}}$ 、 $ME_{\max}$  及  $ME_{\min}$  显著高于对照组, 合并高脂血症组  $ME_{\max}$ 、 $ME_{\text{mean}}$  及  $ME_{\min}$  均显著高于单纯糖尿病组(均  $P < 0.05$ ; 表 4 和图 1)。

表 2. 三组间生物化学指标比较

Table 2. Comparison of biochemical indicators among the three groups

项目	对照组 (n=55)	单纯糖尿病组 (n=52)	合并高脂血症组 (n=60)	统计值	P
FBG/(mmol/L)	4.99±0.69	8.27±1.91 <sup>a</sup>	8.42±1.69 <sup>a</sup>	151.255	<0.001
HbA1c/%	5.11±0.58	8.92±1.43 <sup>a</sup>	8.84±1.85 <sup>a</sup>	239.572	<0.001
TC/(mmol/L)	3.54±0.56	4.04±0.56 <sup>a</sup>	6.12±0.69 <sup>ab</sup>	285.551	<0.001
TG/(mmol/L)	0.83±0.23	1.17±0.30 <sup>a</sup>	2.48±0.84 <sup>ab</sup>	113.036	<0.001
LDLC/(mmol/L)	1.80±0.48	2.27±0.51 <sup>a</sup>	3.23±0.88 <sup>ab</sup>	60.103	<0.001
HDLC/(mmol/L)	1.46±0.18	1.20±0.19 <sup>a</sup>	1.03±0.22 <sup>ab</sup>	68.088	<0.001

注:a为  $P<0.05$ ,与对照组比较;b为  $P<0.05$ ,与单纯糖尿病组比较。

表 3. 三组间颈动脉常规超声参数比较

Table 3. Comparison of routine carotid ultrasound parameters among the three groups

项目	对照组 (n=55)	单纯糖尿病组 (n=52)	合并高脂血症组 (n=60)	统计值	P
Ds/mm	6.90±0.38	6.93±0.31	6.94±0.29	0.222	0.801
Dd/mm	6.35±0.39	6.40±0.29	6.43±0.28	0.778	0.462
$\Delta D$ /mm	0.54±0.14	0.52±0.14	0.50±0.15	0.841	0.433
PSV/(cm/s)	69.28±9.71	69.59±9.84	71.02±8.13	0.587	0.557
IMT/mm	0.64±0.24	0.89±0.22 <sup>a</sup>	0.93±0.22 <sup>a</sup>	25.364	<0.001
$\beta$	5.80±1.36	6.39±1.58 <sup>a</sup>	6.47±1.36 <sup>a</sup>	3.615	0.029

注:a为  $P<0.05$ ,与对照组比较。

表 4. 三组间颈动脉 SWE 参数比较

Table 4. Comparison of SWE parameters of carotid artery among the three groups

单位:kPa

项目	对照组 (n=55)	单纯糖尿病组 (n=52)	合并高脂血症组 (n=60)	统计值	P
ME <sub>max</sub>	72.04±10.36	85.62±10.95 <sup>a</sup>	100.73±10.88 <sup>ab</sup>	102.672	<0.001
ME <sub>mean</sub>	57.80±10.13	68.55±11.47 <sup>a</sup>	86.65±9.60 <sup>ab</sup>	113.616	<0.001
ME <sub>min</sub>	46.83±8.51	56.55±9.35 <sup>a</sup>	69.61±9.71 <sup>ab</sup>	88.553	<0.001

注:a为  $P<0.05$ ,与对照组比较;b为  $P<0.05$ ,与单纯糖尿病组比较。

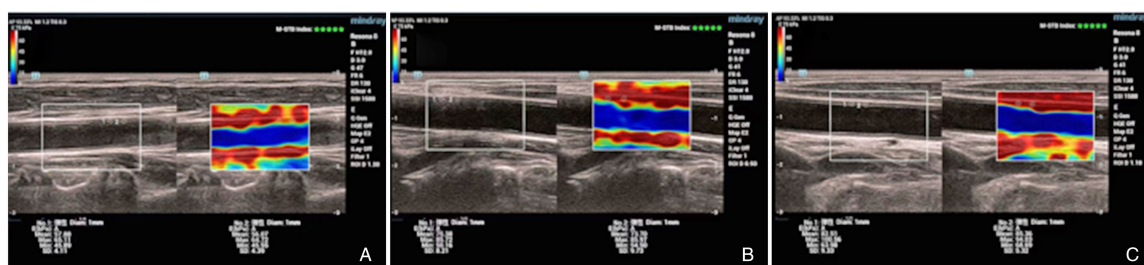


图 1. 颈动脉剪切波弹性成像图

A 为对照组, B 为单纯糖尿病组, C 为合并高脂血症组。

Figure 1. Shear wave elastography of carotid artery

## 2.5 相关性分析

Pearson 相关分析结果显示, 各组 ME<sub>max</sub>、ME<sub>mean</sub>、ME<sub>min</sub> 与 IMT、TC、TG、LDLC、FBG、HbA1c 均呈正相关, 与 HDLC 呈负相关 ( $P<0.01$ ; 图 2)。多元线性回归分析显示, 2 型糖尿病和高脂血症是颈动脉

SWE 参数的独立危险因素 (均  $P<0.01$ ; 表 5)。

## 2.6 重复性检验

SWE 所测得的 ME<sub>max</sub>、ME<sub>mean</sub> 和 ME<sub>min</sub> 值在观察者内 ICC 值均大于 0.90, 说明本研究存在较好的重复性 (表 6 和图 3)。

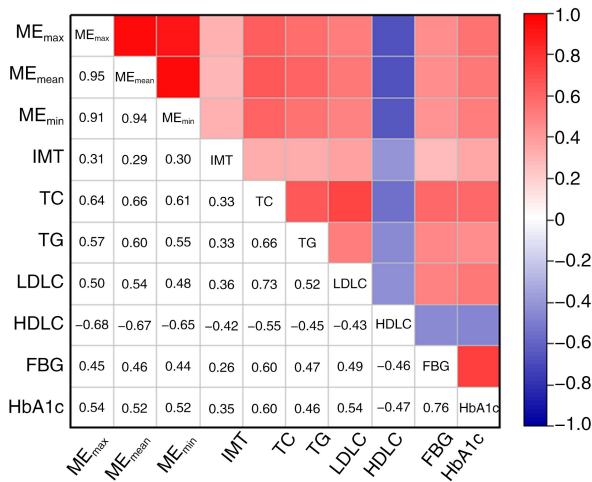


图 2. IMT、TC、TG、LDLC、HDLC、FBG 及 HbA1c 与 SWE 参数的相关性热图

Figure 2. Correlation heatmap of IMT, TC, TG, LDLC, HDLC, FBG, HbA1c and SWE parameters

表 5. 线性回归分析所确定的常规危险因素与 SWE 参数之间的关系

Table 5. Association between conventional risk factors and SWE parameters identified by linear regression analysis

因素	ME <sub>max</sub>		ME <sub>mean</sub>		ME <sub>min</sub>	
	$\beta$	P	$\beta$	P	$\beta$	P
性别	0.088	0.076	0.052	0.281	0.075	0.153
年龄	-0.038	0.437	-0.074	0.128	-0.073	0.166
吸烟	0.242	<0.001	0.211	<0.001	0.185	0.001
BMI	-0.057	0.264	-0.064	0.206	-0.062	0.256
收缩压	0.044	0.379	0.089	0.070	0.126	0.019
T2DM	0.386	<0.001	0.303	<0.001	0.330	<0.001
高脂血症	0.457	<0.001	0.545	<0.001	0.475	<0.001

表 6. 通过计算 ICC 评估观察者内和观察者间重复性

Table 6. Assessment of intra-observer and inter-observer repeatability by calculating ICC

参数	观察者内			观察者间		
	ICC	95% CI	P	ICC	95% CI	P
ME <sub>max</sub>	0.933	0.877 ~ 0.964	<0.001	0.946	0.900 ~ 0.971	<0.001
ME <sub>mean</sub>	0.922	0.857 ~ 0.958	<0.001	0.926	0.865 ~ 0.960	<0.001
ME <sub>min</sub>	0.903	0.824 ~ 0.947	<0.001	0.946	0.818 ~ 0.978	<0.001

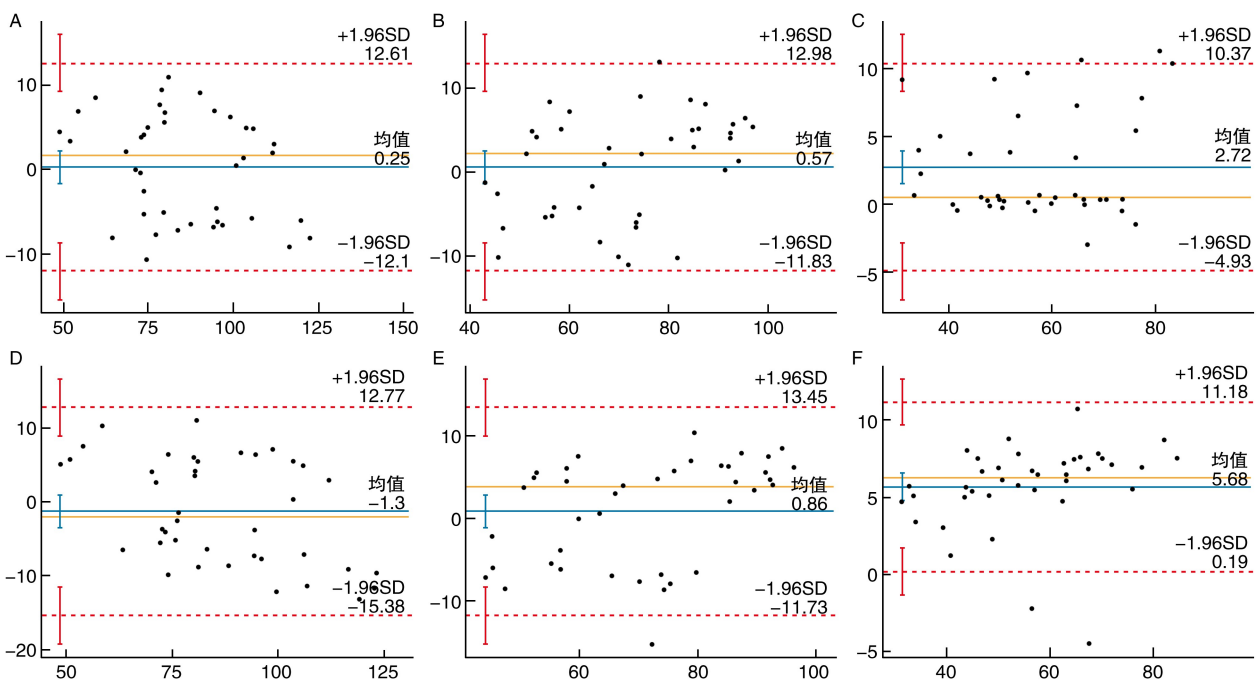


图 3. 颈动脉 SWE 参数 Bland-Altman 图

A: ME<sub>max</sub> 观察者间差异; B: ME<sub>mean</sub> 观察者间差异; C: ME<sub>min</sub> 观察者间差异; D: ME<sub>max</sub> 观察者内差异; E: ME<sub>mean</sub> 观察者内差异; F: ME<sub>min</sub> 观察者内差异。

Figure 3. Bland-Altman plots of carotid SWE parameters

### 3 讨论

T2DM 作为一种系统性代谢疾病,常累及心血管系统,其主要病理基础为动脉粥样硬化,这一病理过程会导致血管僵硬增加、血管弹性降低<sup>[1]</sup>。研究发现,高血糖可诱导造血干细胞与巨噬细胞产生“训练免疫”,进而加剧动脉粥样硬化的发展<sup>[9]</sup>。在 T2DM 患者中,高脂血症普遍存在,其核心机制与胰岛素抵抗引起的多重代谢紊乱密切相关,最终导致富含 TG 的脂蛋白在循环中异常蓄积<sup>[10]</sup>。动脉粥样硬化的起始环节是脂蛋白在血管内膜中的异常沉积并发生氧化修饰,促使巨噬细胞转化为泡沫细胞,并诱导局灶性炎症反应<sup>[11-12]</sup>。因此,高脂血症在 T2DM 患者颈动脉粥样硬化的发生与发展过程中,发挥着重要的促进作用。

本研究发现,单纯糖尿病组  $ME_{max}$ 、 $ME_{mean}$ 、 $ME_{min}$ 、IMT 及  $\beta$  值均显著高于对照组。这主要是由于 T2DM 患者长期处于高血糖状态,会诱导全身氧化应激反应并激活 AGE-RAGE 轴,进而启动并放大 NF- $\kappa$ B 及 NLRP3 炎症小体等炎症通路,降低一氧化氮的生物利用度,最终导致血管内皮功能障碍;在此基础上,高糖环境与炎症刺激还会促使血管平滑肌细胞的表型由收缩型向合成型转换,增强其增殖、迁移能力及细胞外基质的合成,同时促进血管钙化;此外,外膜成纤维细胞介导的胶原沉积与血管重构也会同步发生,这些因素共同加速了动脉粥样硬化的进程<sup>[13-14]</sup>。本研究还发现,合并高脂血症组  $ME_{max}$ 、 $ME_{mean}$  及  $ME_{min}$  均显著高于单纯糖尿病组,提示在 T2DM 患者中,合并高脂血症是颈动脉弹性降低的危险因素。其主要机制如下:其一,升高的低密度脂蛋白(low density lipoprotein, LDL)是动脉粥样硬化启动与进展的核心环节。LDL 穿透血管内皮并沉积于内膜下并发生氧化修饰,其携带的胆固醇被巨噬细胞摄取和呈递,诱导泡沫细胞形成及一系列炎症级联反应,构成动脉粥样硬化的早期病理基础<sup>[15]</sup>。其二,当血浆 TG 水平升高时,TG 会被水解为富含 TG 的脂蛋白残留颗粒以及体积更小的脂蛋白颗粒。若这些残留颗粒生成过多,或其清除过程受损,导致在血液中持续滞留,便容易在内皮下积聚,进而进一步促进动脉粥样硬化的形成<sup>[16]</sup>。其三,高密度脂蛋白(high density lipoprotein, HDL)通过介导胆固醇逆转运、发挥抗炎与抗氧化等作用,对动脉粥样硬化具有延缓效应。而 HDL 水平降低则会增加动脉粥样硬化性心血管疾病的发生风

险<sup>[17]</sup>。随着病变的进展,在脂质沉积、慢性炎症及胶原重构等多重因素的共同作用下,血管壁的结构与生物学特性发生显著改变,最终导致血管弹性功能下降。研究表明,糖尿病与高脂血症可通过免疫调节因子的作用,激活促炎及促动脉粥样硬化相关基因的转录,进而加速动脉粥样硬化的发生发展<sup>[18]</sup>。这一发现揭示了糖脂代谢紊乱在血管病变进程中的关键作用,本研究中的结论与之高度一致。

动脉粥样硬化的主要表现为动脉壁的病理改变,具体包括动脉内膜与中膜增厚,以及血管弹性下降<sup>[19]</sup>。尽管颈动脉 IMT 是动脉粥样硬化早期的结构性标志物,但在其增厚之前,动脉系统的功能改变往往已经先行发生<sup>[20-21]</sup>。Guo 等<sup>[22]</sup>应用 SWE 评估代谢综合征患者的颈动脉弹性,结果表明 SWE 是评估代谢综合征患者动脉粥样硬化风险的重要工具。SWE 通过计算纵向弹性模量直接量化颈动脉壁的局部弹性,且具有非侵入性、可重复性好和广泛可用性等特点,因此可作为评估颈动脉弹性的一种可靠方法<sup>[23]</sup>。在本研究中,单纯糖尿病组与合并高脂血症组的 IMT 及  $\beta$  指标比较差异无统计学意义,但 SWE 参数存在显著差异。这表明相较于常规超声,SWE 在定量评估颈动脉弹性异常方面具有更高的敏感性。

本研究中的 Pearson 相关分析结果显示,三组研究对象的  $ME_{max}$ 、 $ME_{mean}$  及  $ME_{min}$  均与 IMT 呈正相关,这提示 SWE 参数可为颈动脉粥样硬化的诊断与监测提供新的定量指标。三组研究对象的  $ME_{max}$ 、 $ME_{mean}$ 、 $ME_{min}$  与 FBG、HbA1c 均呈正相关,提示颈动脉 SWE 参数的升高与糖代谢紊乱程度密切相关。三组研究对象的  $ME_{max}$ 、 $ME_{mean}$ 、 $ME_{min}$  与 TC、TG、LDLC 均呈正相关,与 HDLC 呈负相关,这进一步提示颈动脉 SWE 参数的变化与高脂血症的严重程度密切相关。多元线性回归分析结果显示,在校正性别、年龄、吸烟史、BMI 及血压等潜在混杂因素后,T2DM 和高脂血症仍与颈动脉 SWE 参数升高独立相关,提示糖脂代谢异常可能是颈动脉弹性受损的独立危险因素。

本研究存在一定局限性:首先,样本量较小,可能限制研究结果的广泛适用性。其次,SWE 技术本身存在局限性,如操作依赖于操作员的经验、动脉搏动及呼吸导致的运动伪影等。最后,尽管患者接受了新一代糖尿病药物和/或降脂治疗,但治疗方案的异质性降低了评估这些治疗对颈动脉弹性影响的准确性。

综上所述,高脂血症与 T2DM 患者颈动脉弹性

的恶化存在显著关联,而 SWE 技术可对合并高脂血症的 T2DM 患者颈动脉弹性进行定量评估。

#### [参考文献]

- [1] AN X, LI Y, SHI S, et al. Clinical significance and influencing factors of carotid pulse wave velocity in patients with diabetic microangiopathy[J]. *J Clin Ultrasound*, 2022, 50(3): 309-316.
- [2] LIAO H Z, LIANG Y, WANG Y, et al. Molecular pathology and therapeutic strategies of type 2 diabetes[J]. *Endocr Metab Immune Disord Drug Targets*, 2023, 23(11): 1392-1399.
- [3] GRUNDY S M, STONE N J, BAILEY A L, et al. 2018 AHA/ACC/AACVPR/AAPA/ABC/ACPM/ADA/AGS/APhA/ASPC/NLA/PCNA guideline on the management of blood cholesterol: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association task force on clinical practice guidelines[J]. *Circulation*, 2019, 139(25): e1082-e1143.
- [4] SANDESARA P B, VIRANI S S, FAZIO S, et al. The forgotten lipids: triglycerides, remnant cholesterol, and atherosclerotic cardiovascular disease risk[J]. *Endocr Rev*, 2019, 40(2): 537-557.
- [5] AGUILAR-BALLESTER M, HURTADO-GENOVÉS G, TABERNER-CORTÉS A, et al. Therapies for the treatment of cardiovascular disease associated with type 2 diabetes and dyslipidemia[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(2): 660.
- [6] BULUM A, IVANAC G, MANDURIĆ F, et al. Contribution of UltraFast™ ultrasound and shear wave elastography in the imaging of carotid artery disease[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2022, 12(5): 1168.
- [7] 中华医学会糖尿病学分会. 中国糖尿病防治指南(2024 版)[J]. *中国实用内科杂志*, 2025, 45(10): 864-874, 892. Diabetes Branch of Chinese Medical Association. China diabetes prevention and control guide (2024)[J]. *Chin J Pract Int Med*, 2025, 45(10): 864-874, 892.
- [8] LI J, DONG Z, WU H, et al. The triglyceride-glucose index is associated with atherosclerosis in patients with symptomatic coronary artery disease, regardless of diabetes mellitus and hyperlipidaemia[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2023, 22(1): 224.
- [9] EDGAR L, AKBAR N, BRAITHWAITE A T, et al. Hyperglycemia induces trained immunity in macrophages and their precursors and promotes atherosclerosis[J]. *Circulation*, 2021, 144(12): 961-982.
- [10] BAHIRU E, HSIAO R, PHILLIPSON D, et al. Mechanisms and treatment of dyslipidemia in diabetes[J]. *Curr Cardiol Rep*, 2021, 23(4): 26.
- [11] 彭雪英, 武怀珠, 王敏杰, 等. 高脂血症、单核细胞亚型与动脉粥样硬化[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2020, 28(9): 815-822. PENG X Y, WU H Z, WANG M J, et al. Hyperlipidemia, monocyte subtypes and atherosclerosis[J]. *Chin J Arterioscler*, 2020, 28(9): 815-822.
- [12] SONG Y, LIU J, ZHAO K, et al. Cholesterol-induced toxicity: an integrated view of the role of cholesterol in multiple diseases[J]. *Cell Metab*, 2021, 33(10): 1911-1925.
- [13] 马雅楠, 刘德敏, 谷国强. 2 型糖尿病与血管衰老研究进展[J]. *临床心血管病杂志*, 2021, 37(9): 791-795. MA Y N, LIU D M, GU G Q. Progress of type 2 diabetes mellitus on vascular aging[J]. *J Clin Cardiol*, 2021, 37(9): 791-795.
- [14] SINGH A, SHADANGI S, GUPTA P K, et al. Type 2 diabetes mellitus: a comprehensive review of pathophysiology, comorbidities, and emerging therapies[J]. *Compr Physiol*, 2025, 15(1): e70003.
- [15] FERENCZ B A, BRAUNWALD E, CATAPANO A L. The LDL cumulative exposure hypothesis: evidence and practical applications[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2024, 21(10): 701-716.
- [16] MIURA Y, SUZUKI H. Hypertriglyceridemia and atherosclerotic carotid artery stenosis[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(24): 16224.
- [17] LINTON M F, YANCEY P G, TAO H, et al. HDL function and atherosclerosis: reactive dicarbonyls as promising targets of therapy[J]. *Circ Res*, 2023, 132(11): 1521-1545.
- [18] ROBINSON K A, AKBAR N, BAIDŽAJEVAS K, et al. Trained immunity in diabetes and hyperlipidemia: Emerging opportunities to target cardiovascular complications and design new therapies[J]. *FASEB J*, 2023, 37(11): e23231.
- [19] DAN H J, WANG Y, SHA H J, et al. Quantitative evaluation of the structure and function of the common carotid artery in hypertriglyceridemic subjects using ultrasound radiofrequency-data technology[J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(11): 3289-3293.
- [20] PAN F S, XU M, YU L, et al. Relationship between carotid intima-media thickness and carotid artery stiffness assessed by ultrafast ultrasound imaging in patients with type 2 diabetes[J]. *Eur J Radiol*, 2019, 111: 34-40.
- [21] 杨茜, 王一凡, 马乐, 等. 剪切波弹性成像评估血液灌流对尿毒症血液透析患者颈动脉弹性的影响[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2025, 33(9): 795-802. YANG Q, WANG Y F, MA L, et al. Shear wave elastography to evaluate the effect of hemoperfusion on carotid artery elasticity in uremic patients undergoing hemodialysis[J]. *Chin J Arterioscler*, 2025, 33(9): 795-802.
- [22] GUO S, GU C, SUN L, et al. Evaluation of carotid stiffness in metabolic syndrome by real-time shear wave elasticity imaging and ultrafast pulse wave velocity[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2024, 50(8): 1280-1286.
- [23] WANG Y, ZHAO C, MENG P, et al. Incremental value of carotid elasticity modulus using shear wave elastography for identifying coronary artery disease in patients without carotid plaque[J]. *J Hypertens*, 2021, 39(6): 1210-1220.

(此文编辑 文玉珊)