

本文引用: 王鑫瑶, 战英杰, 李梦秀, 等. 剪切波弹性成像定量评价左心室不同构型的尿毒症患者颈动脉弹性的应用价值[J]. 中国动脉硬化杂志, 2025, 33(12): 1067-1074. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2025.12.009.

[文章编号] 1007-3949(2025)33-12-1067-08

· 临床研究 ·

剪切波弹性成像定量评价左心室不同构型的尿毒症患者颈动脉弹性的应用价值

王鑫瑶¹, 战英杰², 李梦秀¹, 肖熙豪¹, 崔洪岩¹

1. 大连医科大学附属第二医院超声科, 辽宁省大连市 116027; 2. 大连市第六人民医院超声科, 辽宁省大连市 116113

[摘要] **[目的]** 探讨剪切波弹性成像(SWE)定量评价左心室不同构型的尿毒症患者颈动脉弹性的应用价值。**[方法]** 根据左心室不同构型将纳入的 139 例确诊为尿毒症的患者分成 4 组: 正常构型组(NG, $n=37$)、向心性重构组(CR, $n=37$)、向心性肥厚组(CH, $n=38$)和离心性肥厚组(EH, $n=27$), 并从健康人群中选择 40 例作为对照组。收集并比较受试者的一般资料及生物化学指标; 应用颈动脉常规超声测量左侧颈动脉内膜中膜厚度(IMT)、颈动脉收缩期内径(Ds)、颈动脉舒张期内径(Dd)及收缩期峰值速度(PSV), 并计算管壁运动度(ΔD)和动脉僵硬系数(β); 应用 SWE 获取颈动脉前壁内膜中膜弹性模量最大值(ME_{max})、弹性模量平均值(ME_{mean})、弹性模量最小值(ME_{min})。**[结果]** 与对照组相比, NG 组和 CR 组 IMT 和 β 增高, 但三组间差异均无显著性($P>0.05$); CH 组和 EH 组 IMT 和 β 较对照组、NG 组和 CR 组均显著增高($P<0.05$)。与对照组相比, NG 组、CR 组、CH 组和 EH 组 ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min} 均显著增高, 且 EH 组>CH 组>CR 组>NG 组>对照组, 各组间差异均有显著性($P<0.05$)。各组 ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min} 与 IMT、 β 、甘油三酯(TG)均呈正相关(均 $r>0.39$, 均 $P<0.01$)。线性回归分析结果显示, 尿毒症患者的左心室不同构型与 SWE 参数之间存在显著相关性($P<0.05$)。**[结论]** 不同左心室构型的尿毒症患者颈动脉受累程度不同, SWE 可早期评价该类患者颈动脉弹性。

[关键词] 剪切波弹性成像; 左心室构型; 尿毒症; 颈动脉弹性; 动脉粥样硬化

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

Application value of shear wave elastography in the quantitative evaluation of carotid artery elasticity in uremic patients with different left ventricular configurations

WANG Xinyao¹, ZHAN Yingjie², LI Mengxiu¹, XIAO Xihao¹, CUI Hongyan¹

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

2. Department of Ultrasound, Dalian Sixth People's Hospital, Dalian, Liaoning 116113, China

[ABSTRACT] **Aim** To explore the application value of shear wave elastography (SWE) in the quantitative evaluation of carotid elasticity in uremic patients with different left ventricular configurations. **Methods** A total of 139 uremic patients were classified into four groups based on different left ventricular configurations: normal geometry group (NG, $n=37$), concentric remodeling group (CR, $n=37$), concentric hypertrophy group (CH, $n=38$), and eccentric hypertrophy group (EH, $n=27$). Additionally, 40 healthy individuals were selected as the control group. General clinical data and biochemical indicators of the subjects were collected and compared. Conventional carotid ultrasound was used to assess the intima-media thickness (IMT), peak systolic velocity (PSV), and the systolic and diastolic diameters (Ds and Dd) of the left common carotid artery. The wall motion degree (ΔD) and arterial stiffness coefficient (β) were calculated. The maximum elastic modulus (ME_{max}), mean elastic modulus (ME_{mean}), and minimum elastic modulus (ME_{min}) of the carotid artery anterior wall intima-media were obtained using SWE. **Results** Compared with the control group, IMT and β were elevated in the NG group and CR group, but there were no significant differences among the three groups ($P>0.05$). In contrast, IMT and β values were increased in the CH group and EH group compared with the control group, NG group, and CR group ($P<0.05$). Compared with the control group, ME_{max} , ME_{mean} , and ME_{min} were signifi-

[收稿日期] 2025-02-27

[修回日期] 2025-05-24

[作者简介] 王鑫瑶, 硕士研究生, 住院医师, 研究方向为心血管超声, E-mail: 3165536280@qq.com。通信作者崔洪岩, 硕士, 主任医师, 硕士研究生导师, 研究方向为心血管超声, E-mail: cuihongyan2024@163.com。

cantly elevated in the NG group, CR group, CH group and EH group, with a progressive increase observed in the order: EH group > CH group > CR group > NG group > control group, statistically significant differences were found among all groups ($P < 0.05$). ME_{max} , ME_{mean} and ME_{min} in all groups were positively correlated with IMT, β and triglyceride (TG) (all $r > 0.39$, all $P < 0.01$). The linear regression analysis revealed a statistically significant association between different left ventricular configurations and SWE parameters in uremic patients ($P < 0.05$). **Conclusions** Uremic patients with different left ventricular configurations exhibit varying degrees of carotid artery involvement. SWE can provide quantitative and early evaluation of carotid artery elasticity in these patients.

[**KEY WORDS**] shear wave elastography; left ventricular configuration; uremia; carotid elasticity; atherosclerosis

尿毒症是慢性肾脏病(chronic kidney disease, CKD)的终末期,其典型表现为肾小球滤过率低于 $15 \text{ mL}/(\text{min} \cdot 1.73 \text{ m}^2)$ ^[1]。心血管疾病(cardiovascular diseases, CVD)是影响尿毒症发病率和死亡率的重要原因^[2]。动脉粥样硬化(atherosclerosis, As)被视为二者相关性的主要桥梁^[3]。研究指出^[4],患有 As 相关疾病的患者,其肾功能衰退速度明显快于未患此类疾病的患者。颈动脉作为全身血管状况的监测窗口,可代表其他主要血管的动脉硬化状态。颈动脉内膜中膜厚度(intima-media thickness, IMT)作为评估 As 的生物指标,能够单独预测心血管事件的发生^[5],并反映 As 早期的血管僵硬度和弹性^[6]。然而 As 常在无症状的情况下悄然发展,这一特点推动了医学界对新型监测工具的持续探索。剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)技术的应用为评估该疾病提供了新的视角,即通过分析动脉壁的生物力学特性来提供更全面的诊断信息。相比于应变弹性成像与超快脉搏波等传统超声技术,SWE 不仅具备检测颈动脉内膜中膜硬度微小变化的能力,还可识别潜在不稳定斑块^[7]。研究表明,SWE 可兼顾动脉壁在心动周期中的动态变化(异质性)以及不同空间方向上的力学差异(各向异性),从而实现动脉硬度的精细化定量分析^[8]。因此,本研究旨在应用 SWE 定量评价左心室不同构型的尿毒症患者颈动脉弹性,为该群体发生心血管事件的早期诊断和预防提供依据。

1 资料和方法

1.1 研究对象

纳入 2024 年 4 月—2025 年 2 月大连医科大学附属第二医院确诊为尿毒症的患者 139 例,男性 79 例,女性 60 例,年龄 20~73 岁,平均 (48.74 ± 11.54) 岁。根据左心室的不同构型将尿毒症患者分成 4 组:正常构型(normal geometry, NG)组(37 例)、向心性重构(concentric remodeling, CR)组(37 例)、向心性肥

厚(concentric hypertrophy, CH)组(38 例)和离心性肥厚(eccentric hypertrophy, EH)组(27 例)。纳入标准:(1)满足 2024 年 KDIGO 指南^[9]中尿毒症的诊断标准;(2)左心室射血分数 $> 50\%$;(3)所有患者均在本院接受了统一方案和规定频率的血液净化治疗;(4)颈动脉无斑块形成($\text{IMT} \leq 1.4 \text{ mm}$)。排除标准:(1)既往有充血性心力衰竭,未控制的或症状性心绞痛、先天性心脏病、心肌梗死、原发性高血压、颈动脉狭窄等病变;(2)患有未控制的肺部疾病、严重的肝脏疾病、大量饮酒等;(3)弹性成像图像质量差者。另选择 40 例健康个体将其设为对照组,其中男性 21 例,女性 19 例,年龄 23~67 岁,平均 (47.73 ± 12.27) 岁。本研究已获得本院医学伦理委员会批准(KY2024-466-01),并依据受试者知情同意原则实施。

1.2 临床及生物化学基本资料收集

采集受试者的年龄、性别、身高和体重信息,同时计算其体质指数(body mass index, BMI)。在室温环境下,患者静息 10~15 min 后,测量其收缩压(systolic blood pressure, SBP)、舒张压(diastolic blood pressure, DBP)和心率(heart rate, HR),并使用三次测量的平均值进行记录。所有患者均于清晨空腹采集静脉血,经离心处理后分离血清,采用全自动生物化学分析仪进行酶法检测以下生物化学指标:空腹血糖(fasting blood glucose, FBG)、血清肌酐(serum creatinine, SCr)、尿酸(uric acid, UA)、总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、高密度脂蛋白胆固醇(high density lipoprotein cholesterol, HDLC)、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDLC)。采用全自动化学发光法检测甲状旁腺激素(parathyroid hormone, PTH)和同型半胱氨酸(homocysteine, Hcy)水平。

1.3 超声心动图检查

在左侧卧位下,应用 PHILIPS EPIQ 7C 超声仪进行经胸超声心动图检查,所有参数经过至少三个

心动周期的测量并取其平均值。测量患者的左心室舒张期末内径(left ventricular end-diastolic dimension, LVEDD)、左心室后壁厚度(posterior wall thickness, PWT)及室间隔厚度(interventricular septal thickness, IVST),并根据相关公式计算左心室质量(left ventricular mass, LVM)、左心室质量指数(left ventricular mass index, LVMI)及相对室壁厚度(relative wall thickness, RWT)。LVM = 0.8 × [1.04 × (IVST + LVEDD + PWT)³ - LVEDD³] + 0.6; LVMI = LVM/身高^{2.7};左心室肥厚:LVMI > 50 g/m^{2.7}(男)或 > 47 g/m^{2.7}(女)。RWT = (IVST + PWT)/LVEDD,正常值 < 0.42。根据 LVMI 和 RWT,左心室构型分为 4 型:NG(LVMI、RWT 均正常);CR(LVMI 正常,RWT 大于正常值);CH(LVMI、RWT 均大于正常值);EH(LVMI 大于正常值,RWT 正常)^[10]。

1.4 颈动脉超声检查

采用 Mindray Reasona 8 和 I4-15WU 线阵探头(10~12 MHz)的超声诊断设备,指导受检者去枕仰卧,头颈部右偏并向后仰以便充分暴露左侧颈动脉。在颈总动脉分叉下 1.0~1.5 cm 处,当内膜中膜清晰可见时,进行 IMT 测量。采用超声多普勒成像技术对颈总动脉的收缩期内径(systolic internal diameter, D_s)、舒张期内径(diastolic internal diameter, D_d)及收缩期峰值速度(peak systolic velocity, PSV)分别进行三次测量,取其平均值并计算管壁运动度(wall motion degree, ΔD)及僵硬系数(β)。其中,ΔD = D_s - D_d, β = ln{(SBP/DBP)/[(D_s - D_d)/D_d]}.启动 SWE 模式时,确保颈总动脉长轴切面管壁结构清晰,避免探头施压。要求患者吸气后屏住呼吸,防止吞咽或咳嗽以减少因体动引起的成像伪影,采集 5~10 个心动周期的动态图像,为增强图像的稳定性并降低数据波动性,在分析之前,排除前两帧图像并进行回放,当彩色编码信号均匀覆盖前后壁的内膜中膜,且运动质量评分达到五星级时,冻结并保存图像,重复 3 次。使用集成的 SWE 软件,在颈总动脉分叉下 1.0~1.5 cm 的前壁内膜中膜区域设定 1 mm 直径的圆形感兴趣区(region of interest, ROI)以规避邻近结构或血流信号对测量精度的干扰,以 2 mm 间隔获取 10 个数据点取均值,选取 3 幅图像后再计算其总平均值,最终获得最大弹性模量(maximum elastic modulus, ME_{max})、平均弹性模量(mean elastic modulus, ME_{mean})及最小弹性模量(minimum elastic modulus, ME_{min})。

1.5 重复性检验

从受试者中随机选出 42 人,由两位超声医生利用 SWE 技术测量左侧颈总动脉的 ME_{max}、ME_{mean} 和 ME_{min}。其中一名医生在 1 周后对同一组人再次进行测量,计算观察者间及观察者内的相关系数。

1.6 统计学分析

采用 SPSS 27.0 软件对原始数据进行统计分析。符合正态分布的计量资料,采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,利用单因素方差分析及 LSD-*t* 检验进行多重和两两比较。分类资料以频数和百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验。 $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。采用 Pearson 法分析颈动脉剪切波弹性模量与 β、IMT、TG 之间的相关性。通过多元线性回归分析,在对 SBP 和 DBP 进行校正后,观察左心室不同构型与 SWE 参数的关系。以向心性重构为界限,绘制不同 SWE 参数的受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线,并计算相应的曲线下面积(area under the curve, AUC)。

2 结果

2.1 临床及实验室基本资料

各组间的年龄、性别、HR、BMI、FBG、TC、LDLC 水平比较差异均无统计学意义($P > 0.05$;表 1)。

与对照组相比,NG 组、CR 组、CH 组和 EH 组 SBP 和 DBP 显著升高(均 $P < 0.05$)。与 NG 组相比,CH 组和 EH 组 SBP 和 DBP 均显著升高(均 $P < 0.05$);与 CR 组相比,CH 组和 EH 组 SBP 显著升高(均 $P < 0.05$;表 1)。

与对照组相比,NG 组、CR 组、CH 组和 EH 组 SCr、UA、PTH、TG 和 Hcy 均显著升高,HDLC 显著降低(均 $P < 0.05$)。与 NG 组相比,CR 组、CH 组和 EH 组 TG 均显著升高(均 $P < 0.05$);与 CR 组相比,CH 和 EH 组 TG 显著升高(均 $P < 0.05$);与 CH 组相比,EH 组 TG 显著升高($P < 0.05$;表 1)。

2.2 颈动脉常规参数

各组间的 D_s、D_d、ΔD、PSV 差异均无统计学意义($P > 0.05$)。与对照组、NG 组和 CR 组相比,CH 组 IMT 分别升高了 37.84%、36.00% 和 32.47%,β 分别升高了 22.06%、18.94% 和 17.87%(均 $P < 0.05$)。与对照组、NG 组和 CR 组相比,EH 组 IMT 分别升高了 41.89%、40.00% 和 36.36%,β 分别升高了 22.24%、19.13% 和 18.05%(均 $P < 0.05$;表 2)。

表 1. 临床及实验室基本资料
Table 1. Basic clinical and laboratory data

参数	对照组(n=40)	NG组(n=37)	CR组(n=37)	CH组(n=38)	EH组(n=27)	F/ χ^2 值	P
年龄/岁	47.73±12.27	45.70±12.58	49.95±12.01	50.95±10.64	48.15±10.20	1.144	0.337
男性/[例(%)]	21(52.5)	20(54.1)	21(56.8)	22(57.9)	16(59.3)	0.435	0.980
HR/(次/分)	84.53±12.73	82.97±9.54	84.81±13.18	80.05±12.13	83.70±10.77	0.987	0.416
BMI/(kg/m ²)	23.96±3.33	23.43±2.98	22.97±2.75	24.18±3.88	24.26±2.55	1.040	0.388
SBP/mmHg	119.75±9.62	142.43±7.94 ^a	144.16±8.65 ^a	153.42±9.24 ^{abc}	156.37±8.85 ^{abc}	96.432	<0.001
DBP/mmHg	77.70±6.97	91.81±6.80 ^a	94.54±7.79 ^a	96.74±6.74 ^{ab}	97.56±7.75 ^{ab}	48.285	<0.001
FBG/(mmol/L)	5.05±0.51	5.06±0.69	5.11±0.62	5.13±0.65	5.15±0.53	0.167	0.955
SCr/(μ mol/L)	62.15±11.02	803.32±279.80 ^a	806.20±267.34 ^a	810.49±212.37 ^a	829.28±250.73 ^a	306.287	<0.001
UA/(μ mol/L)	276.07±52.27	417.30±109.17 ^a	421.34±113.85 ^a	423.13±127.07 ^a	425.87±119.41 ^a	30.971	<0.001
PTH/(ng/L)	36.89±12.53	316.73±171.72 ^a	324.45±186.74 ^a	327.34±197.09 ^a	333.07±201.46 ^a	78.126	<0.001
Hcy/(μ mol/L)	8.50±2.32	15.51±3.14 ^a	15.86±3.41 ^a	16.49±3.76 ^a	16.85±3.96 ^a	63.138	<0.001
TC/(mmol/L)	4.25±0.63	4.29±0.80	4.32±0.82	4.38±0.82	4.40±0.83	0.220	0.927
TG/(mmol/L)	1.18±0.51	1.42±0.45 ^a	1.73±0.54 ^{ab}	2.13±0.56 ^{abc}	2.59±0.41 ^{abcd}	41.216	<0.001
HDLc/(mmol/L)	1.32±0.27	1.12±0.29 ^a	1.07±0.30 ^a	1.04±0.29 ^a	0.97±0.35 ^a	7.167	<0.001
LDLc/(mmol/L)	2.55±0.57	2.56±0.68	2.59±0.62	2.62±0.69	2.64±0.63	0.118	0.976

注:a为P<0.05,与对照组相比;b为P<0.05,与NG组相比;c为P<0.05,与CR组相比;d为P<0.05,与CH组相比。

表 2. 各组左侧颈动脉常规超声参数比较

Table 2. Comparison of conventional ultrasound parameters of left carotid artery in each group

参数	对照组(n=40)	NG组(n=37)	CR组(n=37)	CH组(n=38)	EH组(n=27)	F值	P
IMT/mm	0.74±0.10	0.75±0.11	0.77±0.09	1.02±0.10 ^{abc}	1.05±0.10 ^{abc}	75.789	<0.001
Ds/mm	6.93±0.30	6.95±0.32	6.96±0.32	7.01±0.33	7.02±0.27	0.505	0.732
Dd/mm	6.39±0.32	6.41±0.27	6.43±0.27	6.51±0.31	6.54±0.29	1.583	0.181
Δ D/mm	0.55±0.15	0.54±0.14	0.53±0.15	0.50±0.16	0.49±0.11	1.125	0.346
β	5.35±1.42	5.49±1.19	5.54±1.77	6.53±1.87 ^{abc}	6.54±1.28 ^{abc}	5.114	<0.001
PSV/cm/s	61.27±8.94	60.08±7.76	59.71±9.53	58.75±8.12	57.95±8.21	0.754	0.557

注:a为P<0.05,与对照组相比;b为P<0.05,与NG组相比;c为P<0.05,与CR组相比。

2.3 颈动脉 SWE 参数

与对照组相比,NG组、CR组、CH组和EH组ME_{max}分别升高了28.19%、49.77%、83.65%和1.08倍,ME_{mean}分别升高了31.96%、55.11%、95.49%和1.25倍,ME_{min}分别升高了23.12%、42.72%、69.74%和93.13%(均P<0.05)。与NG组相比,CR组、CH组和EH组ME_{max}分别升高了16.83%、43.26%和62.28%,ME_{mean}分别升高了17.54%、48.15%和70.66%,ME_{min}分别升高了15.92%、37.87%和56.86%(均P<0.05)。与CR组相比,CH组和EH组ME_{max}分别升高了22.62%和38.90%,ME_{mean}分别升高了26.04%和45.19%,ME_{min}分别升高了18.94%和35.32%(均P<

0.05)。与CH组相比,EH组ME_{max}、ME_{mean}和ME_{min}分别升高了13.28%、15.20%和13.78%(均P<0.05;表3和图1)。通过ME_{max}、ME_{mean}和ME_{min}对正常构型与左心室重构尿毒症患者的颈动脉弹性差异进行诊断,获得的AUC依次为0.930、0.930和0.885(表4和图2)。

2.4 相关性分析

各组的ME_{max}、ME_{mean}和ME_{min}均与 β 呈正相关($r=0.458, 0.427, 0.421, P<0.01$);同时,它们与IMT亦呈正相关($r=0.566, 0.618, 0.504, P<0.01$),并与TG呈正相关($r=0.625, 0.608, 0.524, P<0.01$;图3)。多元线性回归分析结果显示,校正SBP、DBP后,尿毒症患者的左心室不同构型与

SWE 参数之间仍存在显著相关性(P 均 <0.05)。

表 3. 各组颈动脉超声剪切波弹性模量参数比较

Table 3. Comparison of carotid artery ultrasonic shear wave elastic modulus parameters in each group

单位:kPa

参数	对照组($n=40$)	NG 组($n=37$)	CR 组($n=37$)	CH 组($n=38$)	EH 组($n=27$)	F 值	P
ME_{max}	66.22 ± 11.42	84.89 ± 12.50^a	99.18 ± 10.57^{ab}	121.61 ± 12.27^{abc}	137.76 ± 9.70^{abcd}	210.834	<0.001
ME_{mean}	49.72 ± 8.34	65.61 ± 9.34^a	77.12 ± 10.26^{ab}	97.20 ± 10.01^{abc}	111.97 ± 9.33^{abcd}	226.078	<0.001
ME_{min}	41.48 ± 8.86	51.07 ± 8.80^a	59.20 ± 9.95^{ab}	70.41 ± 12.23^{abc}	80.11 ± 10.15^{abcd}	77.919	<0.001

注:a 为 $P<0.05$, 与对照组相比; b 为 $P<0.05$, 与 NG 组相比; c 为 $P<0.05$, 与 CR 组相比; d 为 $P<0.05$, 与 CH 组相比。

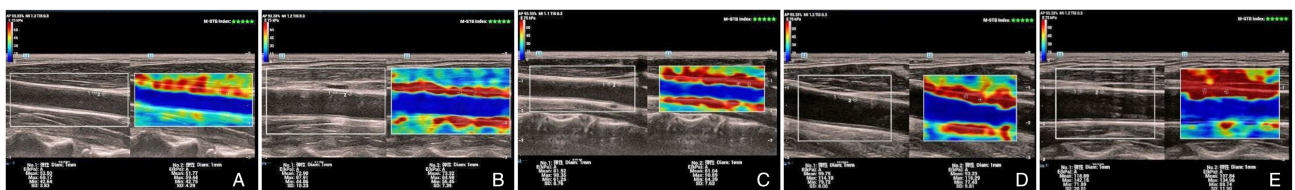


图 1. 颈动脉 SWE 相关参数

A 为对照组, B 为 NG 组, C 为 CR 组, D 为 CH 组, E 为 EH 组。

Figure 1. Carotid artery SWE-related parameters

表 4. 不同 SWE 参数用于诊断正常构型与左心室重构尿毒症患者颈动脉变化的 ROC 曲线分析结果

Table 4. ROC curve analysis results of different SWE parameters in the diagnosis of carotid artery changes in uremic patients with normal configuration and left ventricular remodeling

参数	截断值	$AUC(95\% CI)$	灵敏度	特异度
ME_{max}	96.65 kPa	0.930(0.886 ~ 0.973)	87.3%	86.5%
ME_{mean}	79.68 kPa	0.930(0.889 ~ 0.970)	77.5%	97.3%
ME_{min}	60.61 kPa	0.885(0.793 ~ 0.918)	69.6%	91.9%

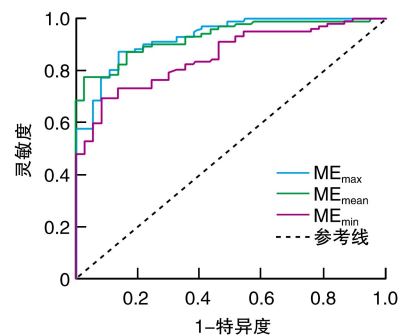


图 2. 不同 SWE 参数用于诊断正常构型与左心室重构尿毒症患者颈动脉变化的 ROC 曲线

Figure 2. ROC curves of different SWE parameters in the diagnosis of carotid artery changes in uremic patients with normal configuration and left ventricular remodeling

2.5 重复性检验

SWE 测得的 ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min} 具有较小的观察者内和观察者间变异性, 重复性好(表 5)。

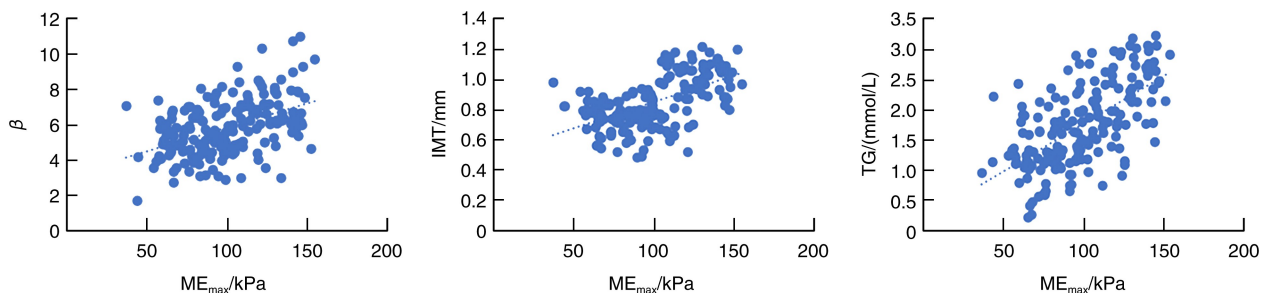


图 3. ME_{max} 与 β 、IMT、TG 相关性散点图

Figure 3. Scatter plot of the correlation between ME_{max} and β , IMT, TG

表 5. 颈动脉弹性模量测量可靠性分析

Table 5. Reliability analysis of carotid artery elastic modulus measurement

参数	观察者内			观察者间		
	ICC	95% 一致性界限	<i>P</i>	ICC	95% 一致性界限	<i>P</i>
ME _{max}	0.953	0.914 ~ 0.975	<0.001	0.946	0.903 ~ 0.971	<0.001
ME _{mean}	0.886	0.798 ~ 0.937	<0.001	0.922	0.860 ~ 0.958	<0.001
ME _{min}	0.870	0.772 ~ 0.928	<0.001	0.833	0.708 ~ 0.908	<0.001

注:ICC 为组内相关系数(intraclass correlation coefficient)。

3 讨论

CKD 被视为一个迅速蔓延的全球性健康挑战。据统计,CKD 1~5 期的平均患病率已高达 13.4%^[11]。尿毒症(即 5 期 CKD)引发的多种并发症,如容量负荷增加、贫血、持续性炎症、营养不良、交感神经过度兴奋、矿物质和骨代谢紊乱以及尿毒症毒素积聚,均为导致心血管高风险事件的特异性因素^[12],且这些因素独立于传统的 CVD 风险因素而存在。尿毒症对心血管功能的损害表现多样,主要包括尿毒症型心肌病、左心室肥厚和心肌纤维化等。此外,血管系统也发生显著变化,如动脉硬化、血管钙化及弹性丧失等问题^[13]。As 作为尿毒症患者罹患 CVD 的主要病理机制,显著提升了心血管事件及全因死亡率的风险^[14]。因此,为尿毒症患者的颈动脉硬化提供量化的数据支持,对临床医生及时进行早期干预具有至关重要的意义。

As 是一种由内皮激活引发的慢性炎性血管病,其特征为大动脉内脂质和钙化物沉积,形成粥样斑块,导致血管狭窄^[15]。本研究中,与对照组相比,NG 组、CR 组、CH 组和 EH 组的 SCr、UA、PTH 和 TG 水平显著升高,而 HDLC 水平显著降低。这一现象主要归因于终末期肾病患者体内代谢废物无法有效排出,导致其在血液循环中积聚,进而产生大量尿毒症毒素,引发以 TG 升高和 HDLC 降低为特征的血脂代谢紊乱^[16]。此外,本研究发现,随着左心室重构程度的加重,TG 水平持续升高,各组间差异具有统计学意义($P < 0.05$)。这一变化提示,脂质代谢异常,特别是 TG 升高,可能在左心室重构的发生与进展中发挥重要作用。本研究结果与 Huang 等^[17]的研究基本一致。因此,在尿毒症患者中,控制 TG 水平有望延缓不良左心室重构,为心血管保护提供潜在干预靶点。本研究结果还表明,在颈动脉常规超声检查中,CH 组和 EH 组的 IMT、 β 显著增高,但两组间无统计学差异($P > 0.05$),而与对照

组、NG 组及 CR 组相比,差异均有显著性($P < 0.05$)。这一现象是由于尿毒症血清通过引发中性粒细胞过度激活及中性粒细胞胞外陷阱的释放,促进泡沫细胞形成,从而降低内皮细胞活力,损害内皮功能^[18]。同时,C 反应蛋白、肿瘤坏死因子 α 等炎症标志物以及尿毒症毒素的显著升高进一步破坏血管内皮。此外,氧化应激的增强促使循环脂质和脂蛋白发生氧化修饰,并通过一氧化氮途径导致 IMT 增厚,降低血管舒张能力,加速 As 的发展^[19]。

SWE 是一种新兴的超声弹性成像技术,通过量化剪切波速度并将其转换为杨氏模量,从而提供组织结构的生物力学信息^[20]。该技术利用聚焦超声束的声辐射力产生振动源,激发横波,组织越硬,剪切波传播速度越快,从而得到更高的弹性模量,并在弹性图上呈现红色^[21]。虽然 SWE 在血管领域的应用相对较少,但已有研究显示,规范探头放置、优化圆形感兴趣区(region of interest, ROI)大小、将 ROI 定位于前壁最佳位置并结合电影回放分析,可有效实现 SWE 检查的高度重复性与操作人员独立性^[22]。此外,SWE 已成功应用于评估酒精性脂肪性肝病患者的颈动脉壁硬度^[23]。Alyami 等^[24]的研究进一步验证了 SWE 在动脉僵硬评估中的可操作性 and 有效性。研究显示^[25],IMT 以及动脉硬度的增加作为 As 的无创生物标志物,能够在无症状期有效指示病变,其中动脉硬度的增加是颈动脉壁结构与功能变化最早的指征之一。本研究采用 SWE 技术对不同左心室构型的尿毒症患者进行左侧颈动脉弹性测量。结果显示,颈动脉 ME_{max}、ME_{mean} 及 ME_{min} 水平均随左心室构型由正常向重构及肥厚进展逐步升高,呈 EH 组 > CH 组 > CR 组 > NG 组 > 对照组的趋势,各组间差异均具有统计学意义($P < 0.05$)。该现象可能与心室重构过程中交感神经系统及肾素-血管紧张素-醛固酮系统持续激活密切相关,进而引起血管平滑肌细胞增殖及胶原沉积增加,加速动脉硬化^[26]。此外,随着疾病进展,心肌受

累程度和范围不断扩大,左心室压力与容量负荷叠加导致血流动力学异常^[27],加之尿毒症患者体内可溶性因子分泌失衡加剧,这些变化持续增加血管壁应力,促进血管钙化,最终引起血管弹性不断下降。值得注意的是,在心脏构型和常规超声下测量颈动脉 IMT 以及 β 均无法区别对照组、NG 组的情况下,SWE 检测显示 NG 组的弹性模量与对照组差异有显著性($P < 0.05$)。这些结果表明,SWE 不仅能够定量评估不同左心室构型尿毒症患者的颈动脉弹性,还能较常规超声更敏感地反映 As 的程度。本研究以向心性重构为界限,通过 SWE 参数(ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min})对正常构型与左心室重构尿毒症患者的颈动脉弹性差异进行诊断,确定其截断值分别为 96.65、79.68 和 60.61 kPa。结果显示,若颈动脉弹性模量超出上述阈值,提示患者心血管事件风险增加,临床上应考虑及早干预。基于此,SWE 参数可作为初诊筛查和高危人群识别的主要指标。同时,在治疗随访期间动态监测 SWE 变化有助于评估干预效果,并为个体化心血管风险管理提供支持。相关性分析表明, ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min} 与 β 、IMT、TG 水平均呈正相关,这进一步支持了 SWE 在动脉弹性定量评估中的应用价值。

本研究存在以下局限性:①在 EH 组中,约 50% 的患者因已存在颈动脉斑块而被排除,导致该组样本量较小。这可能会影响统计效能,在检测组间微弱差异时存在一定的偏倚风险。同时,小样本易受极端值的影响,降低分析结果的稳定性和外推性。未来需在更大样本的基础上进一步验证本研究结果。②SWE 易受血管搏动和呼吸运动的干扰,导致探头偏移,进而影响测量结果;过度施压则可能高估弹性模量。

研究表明,SWE 技术不仅能够对尿毒症患者血管壁出现器质性改变之前,发现颈动脉弹性减弱和僵硬增加等血管功能异常,还可以早期评价左心室不同构型的尿毒症患者颈动脉弹性。其主要优势包括无创性、实时性、可重复性及高图像分辨率,能够满足临床诊断需求。

[参考文献]

[1] BAATEN C C F M J, VONDENHOFF S, NOELS H. Endothelial cell dysfunction and increased cardiovascular risk in patients with chronic kidney disease [J]. *Circ Res*, 2023, 132(8): 970-992.

[2] SCHUETT K, MARX N, LEHRKE M. The cardio-kidney patient: epidemiology, clinical characteristics and therapy

[J]. *Circ Res*, 2023, 132(8): 902-914.

[3] DÜSING P, ZIETZER A, GOODY P R, et al. Vascular pathologies in chronic kidney disease: pathophysiological mechanisms and novel therapeutic approaches [J]. *J Mol Med (Berl)*, 2021, 99(3): 335-348.

[4] ELSAYED E F, TIGHIOUART H, GRIFFITH J, et al. Cardiovascular disease and subsequent kidney disease [J]. *Arch Intern Med*, 2007, 167(11): 1130-1136.

[5] GE J, JING F, JI R, et al. Age-related trends in the predictive value of carotid intima-media thickness for cardiovascular death: a prospective population-based cohort study [J]. *J Am Heart Assoc*, 2023, 12(13): e029656.

[6] 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]. *Eur Radiol*, 2019, 29(3): 1507-1517.

[7] 侯超凡,王梦欣,王涛. 超声新技术在颈动脉内膜切除术前评估颈动脉易损性斑块中的应用进展 [J]. *中国微创外科杂志*, 2024, 24(10): 693-699.

HOU C F, WANG M X, WANG T. Research progress in the application of new ultrasound techniques for evaluating vulnerable carotid plaques before carotid endarterectomy [J]. *Chin J Minim Invasive Surg*, 2024, 24(10): 693-699.

[8] WANG Y H, KANG Y Q, JIN X Y, et al. Reference values of the carotid elastic modulus using shear wave elastography and arterial stiffness change in coronary slow flow [J]. *Eur J Radiol*, 2022, 157: 110582.

[9] LEVIN A, AHMED S B, CARRERO J J, et al. Executive summary of the KDIGO 2024 clinical practice guideline for the evaluation and management of chronic kidney disease: known knowns and known unknowns [J]. *Kidney Int*, 2024, 105(4): 684-701.

[10] 林琳,林雪萍,沈波,等. 非透析慢性肾脏病患者 sST2、NT-proBNP、hs-cTnT 与左心室构型的相关性 [J]. *中国临床医学*, 2023, 30(6): 919-926.

LIN L, LIN X P, SHEN B, et al. Correlations between sST2, NT-proBNP, hs-cTnT and left ventricular geometry in patients with chronic kidney disease [J]. *Chin J Clin Med*, 2023, 30(6): 919-926.

[11] HILL N R, FATOBA S T, OKE J L, et al. Global prevalence of chronic kidney disease: a systematic review and Meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2016, 11(7): e0158765.

[12] ZOCCALI C, MALLAMACI F, ADAMCZAK M, et al. Cardiovascular complications in chronic kidney disease: a review from the European renal and cardiovascular medicine working group of the European renal association [J]. *Cardiovasc Res*, 2023, 119(11): 2017-2032.

[13] CHIRAKARNJANAKORN S, NAVANEETHAN S D, FRANCIS G S, et al. Cardiovascular impact in patients undergo-

- ing maintenance hemodialysis; clinical management considerations[J]. *Int J Cardiol*, 2017, 232: 12-23.
- [14] 刘庚鑫, 张格第, 郭敏, 等. MicroRNA 与慢性肾脏病并发动脉粥样硬化相关性与中国药干预研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(6): 2177-2186.
LIU G X, ZHANG G D, GUO M, et al. Research progress on the correlation between microRNA and atherosclerosis complicated by chronic kidney disease and Chinese medicine intervention[J]. *Sci Technol Eng*, 2024, 24(6): 2177-2186.
- [15] 邹婷婷, 侯经远, 钟志雄. HSPB1 调节炎症反应在动脉粥样硬化作用机制及靶向治疗的研究进展[J/OL]. *中国动脉硬化杂志*, 2025 [2025-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1262.r.20250414.1014.024>.
ZOU T T, HOU J Y, ZHONG Z X. Advances in HSPB1-mediated inflammatory regulation and targeted therapeutic strategies in atherosclerosis[J/OL]. *Chin J Arterioscler*, 2025 [2025-05-20]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1262.r.20250414.1014.024>.
- [16] TUNBRIDGE M J, JARDINE A G. Atherosclerotic vascular disease associated with chronic kidney disease[J]. *Cardiol Clin*, 2021, 39(3): 403-414.
- [17] HUANG X, DENG K, QIN J, et al. Association between lipid profiles and left ventricular hypertrophy: new evidence from a retrospective study[J]. *Chin Med Sci J*, 2022, 37(2): 103-117.
- [18] LEE H W, NIZET V, AN J N, et al. Uremic serum damages endothelium by provoking excessive neutrophil extracellular trap formation[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 21439.
- [19] 常思雨, 辜博, 张晓东. HIF-1 α 调控动脉粥样硬化的研究进展[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2025, 33(12): 1092-1097.
CHANG S Y, GU B, ZHANG X D. Advance in hypoxia regulation of atherosclerosis[J]. *Chin J Arterioscler*, 2025, 33(12): 1092-1097.
- [20] JONKMAN A H, DE KORTE C L. Shear wave elastography of the diaphragm: good vibrations? [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2021, 204(7): 748-750.
- [21] 张景锋, 万艳萍, 王文娟, 等. 剪切波弹性成像测量冻结肩患者喙肱韧带硬度的可重复性研究[J]. *临床超声医学杂志*, 2024, 26(10): 840-845.
ZHANG J F, WAN Y P, WANG W J, et al. Study on reproducibility of shear wave elastography for assessing the stiffness of coracohumeral ligament in patients with frozen shoulder[J]. *J Clin Ultrasound Med*, 2024, 26(10): 840-845.
- [22] UYSAL S, KALYONCU UCAR A, OZDEDE A, et al. Carotid artery ultrasonography and shear wave elastography in Takayasu's arteritis: a comparative analysis with diabetes mellitus[J]. *Clin Exp Rheumatol*, 2025, 43(4): 636-646.
- [23] 李希娅, 于婷婷, 张孟梦, 等. 剪切波弹性成像定量评估不同程度酒精性脂肪性肝病颈总动脉弹性[J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(10): 1508-1513.
LI X Y, YU T T, ZHANG M M, et al. Shear wave elastography for quantitative evaluation on common carotid artery elasticity in patients with different degrees alcoholic fatty disease[J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2023, 39(10): 1508-1513.
- [24] ALYAMI J, ALMUTAIRI F. Arterial stiffness assessment in healthy participants using shear wave elastography[J]. *Curr Med Imaging*, 2022, 18(10): 1086-1092.
- [25] FERNÁNDEZ-ALVAREZ V, LINARES SÁNCHEZ M, LÓPEZ ALVAREZ F, et al. Evaluation of intima-media thickness and arterial stiffness as early ultrasound biomarkers of carotid artery atherosclerosis[J]. *Cardiol Ther*, 2022, 11(2): 231-247.
- [26] MANOLIS A A, MANOLIS T A, MANOLIS A S. Neurohumoral activation in heart failure[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(20): 15472.
- [27] 祁英香, 陈晓菲, 姜志荣. 三维斑点追踪技术评价不同左室构型尿毒症患者左室收缩功能的应用价值[J]. *临床超声医学杂志*, 2022, 24(6): 411-416.
QI Y X, CHEN X F, JIANG Z R. Application value of three-dimensional speckle tracking imaging in the evaluation of left ventricular systolic function in uremic patients with different left ventricular configurations[J]. *J Clin Ultrasound Med*, 2022, 24(6): 411-416.

(此文编辑 许雪梅)