

本文引用: 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. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2025.09.008.

[文章编号] 1007-3949(2025)33-09-0795-08

· 临床研究 ·

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

杨茜, 王一凡, 马乐, 王许, 王欣宇, 马雪美惠, 刘媛媛, 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)评估血液灌流对尿毒症血液透析患者颈动脉弹性的影响。**[方法]** 依据透析方案将78例尿毒症患者分为单纯血液透析组和血液透析联合血液灌流组,另纳入40名健康体检者为健康对照组。收集受检者基本信息、临床生物化学指标;应用常规超声测量颈动脉内膜中膜厚度(IMT)、收缩期末内径(Ds)、舒张期末内径(Dd)、收缩期血流峰值速度(PSV),计算获得管壁运动度(ΔD)和僵硬系数(β);应用SWE获取颈动脉前壁内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]** 三组间Ds、Dd、 ΔD 及PSV比较差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。与健康对照组相比,血液透析联合血液灌流组和单纯血液透析组IMT、 β 和SWE参数明显升高(均 $P<0.05$)。与单纯血液透析组相比,血液透析联合血液灌流组SWE参数降低($P<0.05$),而IMT、 β 差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。在三组中,SWE参数与IMT、 β 、低密度脂蛋白胆固醇呈正相关($r>0.37$,均 $P<0.01$),与高密度脂蛋白胆固醇呈负相关($|r|>0.24$,均 $P<0.05$)。SWE参数的ROC曲线下面积均高于常规超声参数(均 $P<0.05$)。**[结论]** SWE能有效评估血液灌流对尿毒症血液透析患者颈动脉弹性的影响。

[关键词] 剪切波弹性成像; 尿毒症; 血液透析; 血液灌流; 颈动脉弹性

[中图分类号] R5;R692

[文献标识码] A

Shear wave elastography to evaluate the effect of hemoperfusion on carotid artery elasticity in uremic patients undergoing hemodialysis

YANG Xi, WANG Yifan, MA Le, WANG Xu, WANG Xinyu, MA Xuemeihui, LIU Yuanyuan, LI Guangsen

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

[ABSTRACT] **Aim** To evaluate the effect of hemoperfusion on carotid artery elasticity in patients undergoing hemodialysis using shear wave elastography (SWE). **Methods** Seventy-eight patients with uremia were included, and divided into two groups based on dialysis regimen: hemodialysis alone group and hemodialysis combined with hemoperfusion group, while 40 healthy subjects were selected as control group. Then general information, clinical data and biochemical indices were collected. The carotid intima-media thickness (IMT), carotid artery inner diameter at the end of systole (Ds), the carotid artery inner diameter at the end of diastole (Dd) and the peak systolic flow velocity (PSV) were measured by conventional ultrasound. The degree of arterial wall motion (ΔD) and arterial stiffness coefficient (β) were calculated. Elasticity of intima-medial layer in the anterior carotid artery was measured by SWE, including the maximum modulus of elasticity (ME_{max}), mean modulus of elasticity (ME_{mean}), minimum modulus of elasticity (ME_{min}). **Results** There were no statistically significant differences in Ds, Dd, ΔD and PSV among the three groups (all $P>0.05$). Compared with control group, the IMT, β , SWE parameters were significantly increased in the hemodialysis combined with hemoperfusion group and the hemodialysis alone group. Compared with hemodialysis alone group, the SWE parameters were significantly decreased in the hemodialysis combined with hemoperfusion group ($P<0.05$), while there were no statistically significant differences in IMT and β (both $P>0.05$). In the three groups, SWE parameters were positively correlated with IMT, β and LDLC ($r>0.37$, all $P<0.01$) and negatively correlated with HDLC ($|r|>0.24$, all $P<0.05$). The

[收稿日期] 2025-01-03

[修回日期] 2025-04-03

[作者简介] 杨茜, 硕士研究生, 住院医师, 研究方向为心血管超声, E-mail: yang1875725820@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: liguansen09@163.com。

areas under the ROC curves of the SWE parameters were all higher than those of the conventional ultrasound parameters (all $P < 0.05$). **Conclusion** SWE can effectively assess the effect of hemoperfusion on the elasticity of carotid arteries in uremic patients undergoing hemodialysis.

[**KEY WORDS**] shear wave elastography; uremia; hemodialysis; hemoperfusion; carotid artery elasticity

尿毒症是肾脏功能终末衰竭而引发的一系列症候群。尿毒症患者由于肾功能衰竭,体内的代谢物无法经肾脏排出,临床常规使用血液透析(hemodialysis, HD)替代肾脏的滤过功能^[1]。然而,单一的血液透析仍无法彻底清除体内的代谢物。体内残留的代谢物、血液透析造成的慢性炎症反应、继发的脂质代谢紊乱等多种因素均会导致动脉粥样硬化的进程加快^[2-5]。血液灌流(hemoperfusion, HP)联合血液透析方案较单独使用血液透析治疗能进一步提高脂质及代谢物的清除率,从而延缓动脉粥样硬化的进程。颈动脉在反映全身大动脉粥样硬化方面具有代表性,颈动脉内膜中膜厚度(intima-media thickness, IMT)和颈动脉粥样斑块的形成与冠状动脉狭窄的程度及心血管危险事件的发生有关^[6-7],而动脉粥样硬化隐匿表现为血管内皮功能障碍及弹性下降,且常发生于IMT变化之前,因此早期监测颈动脉管壁弹性变化,对监测尿毒症患者心血管疾病(cardiovascular diseases, CVD)的发展有重要意义。剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)是一种无创测量组织硬度的新技术,可通过跟踪穿过组织的剪切波来定量检测组织及器官的弹性。本研究的目的是运用SWE定量评估血液灌流对尿毒症血液透析患者颈动脉弹性的影响。

1 资料和方法

1.1 研究对象

纳入2023年9月—2024年9月期间,我院透析中心常规透析的78例尿毒症患者,年龄30~82岁,平均(60.7±11.7)岁。受检者均符合2024年KDIGO指南^[8]所定义的慢性肾脏病(chronic kidney disease, CKD)5期。根据患者所采用的透析方案,将患者划分为两组:①单纯血液透析组38例,其中男性24例,女性14例,年龄30~77岁,平均(58.7±11.9)岁;②血液透析联合血液灌流组40例,其中男性23例,女性17例,年龄37~82岁,平均(62.6±11.3)岁。纳入标准:颈动脉超声检查均无斑块形成,即IMT<1.5 mm。排除标准:①颈动脉狭窄、冠心病、原发性高血压、脑卒中等心脑血管疾病患者,以及左心室射血分数低于50%的患者;②感染、肿

瘤或免疫系统缺陷患者;③在观察期间,服用影响血脂代谢药物的患者以及合并糖尿病的患者;④排除不满足随访调查要求的患者。另纳入40名健康体检者作为健康对照组,其中男性24例,女性16例,年龄36~82岁,平均(61.2±9.1)岁。经本院伦理委员会批准(审批号:KY2024348),且遵循了患者知情同意权。

尿毒症患者透析方案:单纯血液透析组继续接受血液透析,3次/周。血液透析联合血液灌流组在血液透析的基础上增加血液灌流,联合血液灌流频率为1~2次/月,并按既定方案维持治疗6个月。在每位患者维持治疗6个月后,测量其临床实验室指标、颈动脉超声常规指标及弹性指标。

1.2 基本信息和临床实验室指标

记录受检者性别、年龄、尿毒症病程、估算的肾小球滤过率(estimated glomerular filtration rate, eGFR)、身高、体重,计算体质指数(body mass index, BMI),于静息状态下测量心率、收缩压(systolic blood pressure, SBP)及舒张压(diastolic blood pressure, DBP)。维持治疗6个月后,抽取受检者空腹状态下外周静脉血3 mL,离心后取血清,采用酶法测定总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG),采用遮蔽法测定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),采用速率法测定血尿素氮(blood urea nitrogen, BUN),采用酶促动力学法测定血肌酐(blood creatinine, SCr)、尿酸(blood uric acid, BUA),采用色谱法测定同型半胱氨酸(homocysteine, Hcy)。

1.3 颈动脉常规超声检测参数

应用Mindray R8彩色多普勒超声诊断仪(L4-15WU线阵探头,频率10~12 MHz),该仪器配备弹性成像软件。嘱受检者去枕仰卧暴露颈部,头过伸并向右偏转约45°;获取左侧颈总动脉长轴切面并使内膜中膜显示清晰,于颈总动脉分叉处下方1.0~1.5 cm处测量IMT;使用M型超声与多普勒超声分别测量颈总动脉收缩期末内径(diameter at the end of systole, Ds)、舒张期末内径(diameter at the end of diastole, Dd)及收缩期血流峰值速度(peak systolic flow velocity, PSV);通过计算获得管壁运动

度(ΔD)和僵硬系数(β), $\Delta D = D_s - D_d$, $\beta = \ln(\text{收缩压}/\text{舒张压})/[(D_s - D_d)/D_d]$ 。以上参数均经过 3 次测量后取其平均值。

1.4 颈动脉 SWE 超声检测参数

在上述参数的相同位置稳固探头,保持颈动脉长轴切面显示清晰,切换至 SWE 运动稳定性模式。避免探头加压,嘱受检者吸气后屏气,避免吞咽与咳嗽,当彩色编码信号均匀覆盖前后壁中膜且运动指数为五星级时冻结并储存图像,重复操作 3 次,应用仪器自带的程序于颈总动脉分叉下方 1.0 ~ 1.5 cm 前壁处测量内中膜弹性模量(modulus of elasticity, ME),感兴趣区设置为直径为 1 mm 圆形,沿前壁内中膜走行每隔 2 mm 测量 1 次,连续测量 10 次,重复测量储存的 3 张图,取 3 张图的总平均值作为最终结果,以获得最终的 ME_{mean} 、 ME_{min} 、 ME_{max} 。

1.5 重复性检验

随机抽取 30 名受检者,由两名超声医师使用 SWE 技术分别测量受检者颈动脉弹性参数;一周后,再次由其中一位超声医师对这 30 名受检者进行与上述相同的测量,分析观察者间和观察者内的变异性。

1.6 统计学分析

使用 SPSS 27.0 软件进行统计学分析。符合正态分布的定量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,三组间的差异比较使用单因素方差分析,组间比较使用 LSD-*t* 检验,不符合正态分布的资料以四分位数表示,组间比较采用 Mann-Whitney 检验;定性资料以例(%)表示,采用卡方检验, $P < 0.05$ 被认为差异具有统计学意义。采用 Pearson 分析颈动脉剪切波弹性模量与 LDLC、HDLc、IMT 及 β 之间的相关性。分别绘制 β 、IMT、颈动脉剪切波弹性模量的 ROC 曲线图,并计算曲线下面积(area under the curve, AUC)。使用 Bland-Altman 法分析观察者间和观察者内变异性。

2 结果

2.1 一般临床资料比较

三组在年龄、性别、心率、SBP、DBP 及 BMI 方面差异均无显著性($P > 0.05$);血液透析联合血液灌流组与单纯血液透析组在尿毒症病程、初始 eGFR 值、Hcy 水平以及额外使用血液透析滤过(hemodiafiltration, HDF)的人数方面差异均无显著性($P > 0.05$;表 1)。

表 1. 三组间一般临床资料比较

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

项目	健康对照组 ($n=40$)	单纯血液透析组 ($n=38$)	血液透析联合血液 灌流组($n=40$)	统计值	<i>P</i>
年龄/岁	61.2±9.1	58.7±11.9	62.6±11.3	1.311	0.273
男/女/[例/(%)]	24(60.0)/16(40.0)	24(63.2)/14(36.8)	23(57.5)/17(42.5)	0.261	0.878
心率/(次/分)	77.3±8.2	75.5±7.7	78.1±8.6	0.983	0.377
BMI/(kg/m ²)	23.8±2.1	24.9±3.0	23.9±2.9	1.975	0.143
SBP/mmHg	113.9±5.1	116.2±5.7	116.1±5.8	2.274	0.107
DBP/mmHg	68.6±6.0	68.3±5.5	69.6±5.6	0.525	0.593
尿毒症病程/月		54.0(18.5,96.5)	52.0(27.3,89.3)	0.121	0.904
初始 eGFR/[mL/(min·1.73 m ²)]		4.1(3.41,5.02)	4.3(3.75,5.54)	0.875	0.382
高 Hcy/[例(%)]		18(47.4)	17(42.5)	0.187	0.666
使用 HDF/[例(%)]		6(15.8)	6(15.0)	0.009	0.923

注:空白处表示不适用。

2.2 临床生物化学指标比较

血液透析联合血液灌流组 BUN、SCr、BUA、TG 和 LDLc 较健康对照组分别升高了 3.55、12.53、0.32、0.27 和 0.16 倍, HDLc 较健康对照组下降了 14.15% (均 $P < 0.05$);单纯血液透析组 BUN、SCr、BUA、TC、TG 和 LDLc 较健康对照组升高了 4.14、14.32、0.48、0.31、0.48 和 0.53 倍, HDLc 较健康对照组下降了 24.74% (均 $P < 0.05$);血液透析联合血

液灌流组 BUN、SCr、BUA、TC、TG 和 LDLc 较单纯血液透析组下降了 12.93%、13.22%、11.84%、20.45%、17.05% 和 32.26% (均 $P < 0.05$;表 2)。

2.3 常规超声参数比较

三组之间的 D_s 、 D_d 、 ΔD 及 PSV 差异均无统计学意义 (均 $P > 0.05$);血液透析联合血液灌流组 IMT、 β 较健康对照组升高了 8.11%、6.60% (均 $P < 0.05$);单纯血液透析组 IMT、 β 较健康对照组升高

了 14.86%、11.94% (均 $P < 0.05$); 血液透析联合血液灌流组 IMT 、 β 略低于单纯血液透析组, 但差异不具有统计学意义 (均 $P > 0.05$; 表 3)。

2.4 SWE 参数分析

血液透析联合血液灌流组 ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min} 较健康对照组增高了 21.93%、32.44% 和 35.45% (均 $P < 0.05$), 单纯血液透析组 ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min} 较健康对照组增高了 41.61%、47.54% 和 50.69% (均 $P < 0.05$), 且血液透析联合血液灌流组 ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min} 较单纯血液透析组降低了 16.13%、11.40% 和 11.26% (均 $P < 0.05$;

表 4、图 1 和图 2)。相关分析显示, 在这三组中, ME_{max} 、 ME_{mean} 、 ME_{min} 与 β 、 IMT 、 $LDLC$ 呈正相关, 而与 $HDLC$ 呈负相关 (均 $P < 0.05$; 图 3)。分别采用 β 、 IMT 、 ME_{max} 、 ME_{mean} 及 ME_{min} 对健康对照组与尿毒症患者颈动脉弹性变化进行诊断, 所获得的 AUC 值分别为 0.675、0.665、0.919、0.953 及 0.929。分别采用 β 、 IMT 、 ME_{max} 、 ME_{mean} 及 ME_{min} 对单纯血液透析患者与血液透析联合血液灌流患者颈动脉弹性进行诊断, 所获得的 AUC 分别为 0.607、0.582、0.811、0.746 及 0.693。SWE 参数的 AUC 均高于常规超声参数 (均 $P < 0.05$; 图 4 和表 5)。

表 2. 三组间临床生物化学指标比较

Table 2. Comparison of clinical biochemical indicators among the three groups

项目	健康对照组 ($n=40$)	单纯血液透析组 ($n=38$)	血液透析联合血液 灌流组 ($n=40$)	统计值	P
BUN/(mmol/L)	5.47±1.27	28.11±5.62 ^a	24.89±6.04 ^{ab}	256.840	<0.001
SCr/(μ mol/L)	67.19±12.27	1 029.22±228.74 ^a	909.02±196.45 ^{ab}	362.275	<0.001
BUA/(μ mol/L)	320.79±79.91	474.51±92.83 ^a	424.28±98.85 ^{ab}	29.212	<0.001
TC/(mmol/L)	4.05±0.78	5.30±0.93 ^a	4.40±0.89 ^b	21.708	<0.001
TG/(mmol/L)	1.39±0.56	2.06±0.71 ^a	1.76±0.73 ^{ab}	9.889	<0.001
HDLc/(mmol/L)	1.21±0.34	0.97±0.24 ^a	1.06±0.29 ^a	7.031	0.001
LDLC/(mmol/L)	2.14±0.58	3.28±0.74 ^a	2.48±0.65 ^{ab}	30.593	<0.001

注: a 为 $P < 0.05$, 与健康对照组比较; b 为 $P < 0.05$, 与单纯血液透析组比较。

表 3. 三组间颈动脉常规超声参数比较

Table 3. Comparison of conventional ultrasound parameters among the three groups

项目	健康对照组 ($n=40$)	单纯血液透析组 ($n=38$)	血液透析联合血液 灌流组 ($n=40$)	统计值	P
IMT/mm	0.74±0.11	0.85±0.17 ^a	0.80±0.15 ^a	6.176	0.003
Ds/mm	7.09±0.28	7.06±0.26	7.15±0.29	0.989	0.375
Dd/mm	6.45±0.25	6.46±0.25	6.53±0.24	1.330	0.269
ΔD /mm	0.65±0.11	0.60±0.10	0.62±0.10	1.977	0.143
β	5.61±0.80	6.28±0.75 ^a	5.98±0.79 ^a	7.302	0.001
PSV/(cm/s)	75.97±10.04	74.69±9.31	76.33±11.82	0.263	0.769

注: a 为 $P < 0.05$, 与健康对照组比较。

表 4. 三组间颈动脉超声剪切波弹性模量值比较

Table 4. Comparison of shear wave elastic modulus values of carotid artery ultrasound among the three groups

单位: kPa

项目	健康对照组 ($n=40$)	单纯血液透析组 ($n=38$)	血液透析联合血液 灌流组 ($n=40$)	统计值	P
ME_{max}	78.38±10.11	110.99±12.69 ^a	95.57±11.59 ^{ab}	78.619	<0.001
ME_{mean}	63.78±10.06	94.10±11.45 ^a	84.47±10.14 ^{ab}	84.571	<0.001
ME_{min}	49.06±8.88	73.93±10.20 ^a	66.45±10.05 ^{ab}	67.659	<0.001

注: a 为 $P < 0.05$, 与健康对照组比较; b 为 $P < 0.05$, 与单纯血液透析组比较。

表 5. 不同超声指标诊断不同群体颈动脉结构或弹性变化的效能
Table 5. Efficacy of different ultrasound indicators to diagnose structural or elastic changes in the carotid arteries in different populations

项目	截断值	AUC(95% CI)	灵敏度	特异度
区分健康对照者与尿毒症患者颈动脉差异的能力				
IMT	0.80 mm	0.665(0.572 ~ 0.749)	0.577	0.725
β	5.77 kPa	0.675(0.582 ~ 0.758)	0.654	0.625
ME _{max}	93.78 kPa	0.919(0.855 ~ 0.961)	0.705	0.680
ME _{mean}	75.10 kPa	0.953(0.897 ~ 0.983)	0.885	0.875
ME _{min}	60.46 kPa	0.929(0.867 ~ 0.968)	0.808	0.875
区分单纯血液透析组与联合血液透析联合血液灌流组尿毒症患者颈动脉差异的能力				
IMT		0.582(0.464 ~ 0.692)		
β		0.607(0.489 ~ 0.715)		
ME _{max}	99.70 kPa	0.811(0.706 ~ 0.890)	0.789	0.700
ME _{mean}	84.14 kPa	0.746(0.635 ~ 0.838)	0.868	0.55
ME _{min}	70.44 kPa	0.693(0.578 ~ 0.792)	0.632	0.675

注:空白表示不适用。

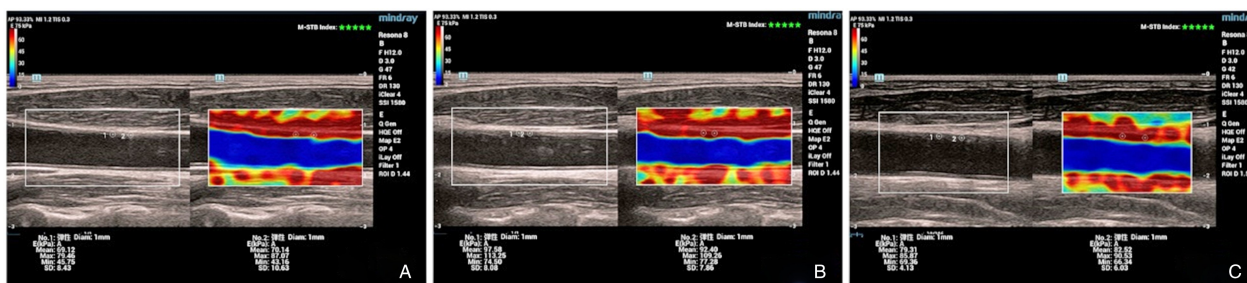


图 1. SWE 相关参数图

A 为健康对照组, B 为单纯血液透析组, C 为血液透析联合血液灌流组。

Figure 1. Diagram of SWE related parameters

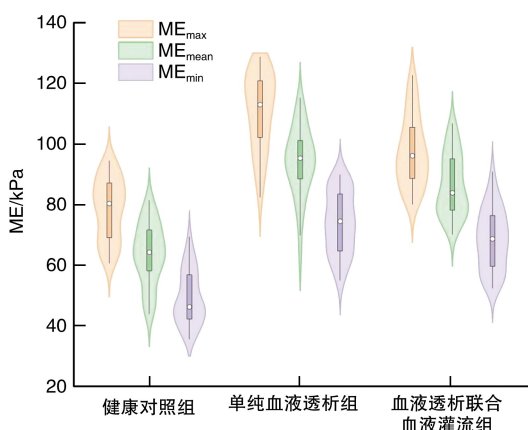


图 2. 三组 SWE 参数小提琴图

Figure 2. Violin plots of SWE parameters in the three groups

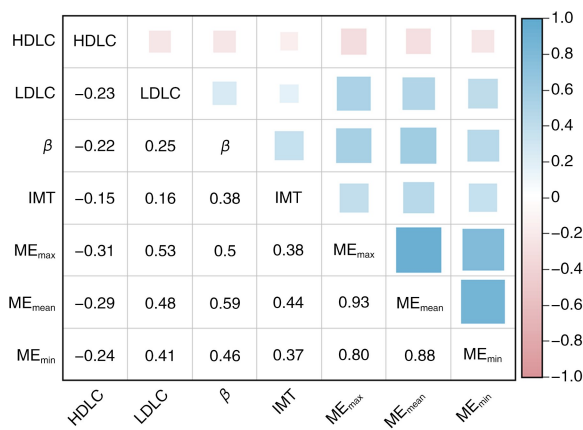


图 3. SWE 参数与 HDLC、LDLC、IMT 及 β 的相关性分析热图

Figure 3. Heat map for correlation analysis between SWE parameters and HDLC, LDLC, IMT and β

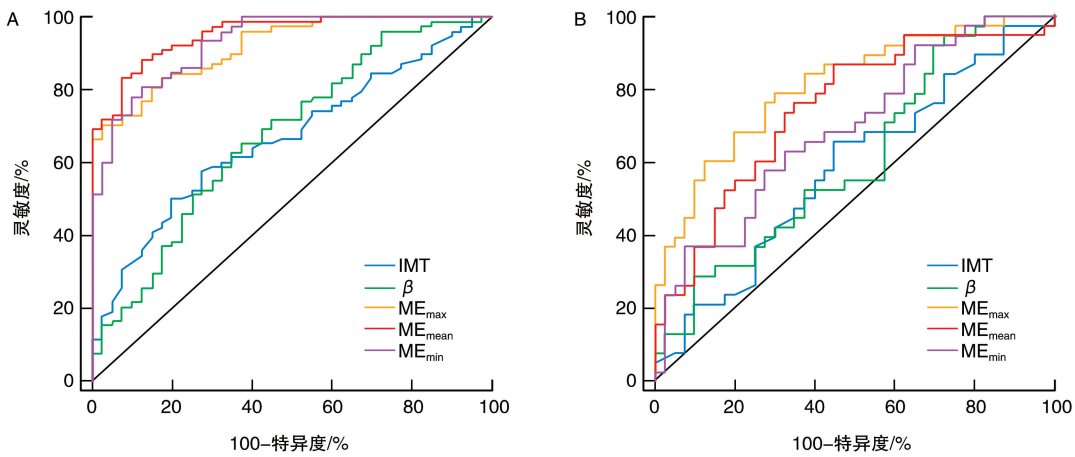


图 4. ROC 曲线图

A 为不同超声检查指标诊断健康对照组与尿毒症患者颈动脉变化所得的 ROC 曲线, B 为不同超声检查指标诊断单纯血液透析组与血液透析联合血液灌流组尿毒症患者颈动脉变化所得的 ROC 曲线。

Figure 4. Diagram of ROC curve

2.5 重复性检验

SWE 所测得的 ME_{max} 、 ME_{mean} 和 ME_{min} 在观察

者内与观察者间均具有较好的重复性(图 5)。

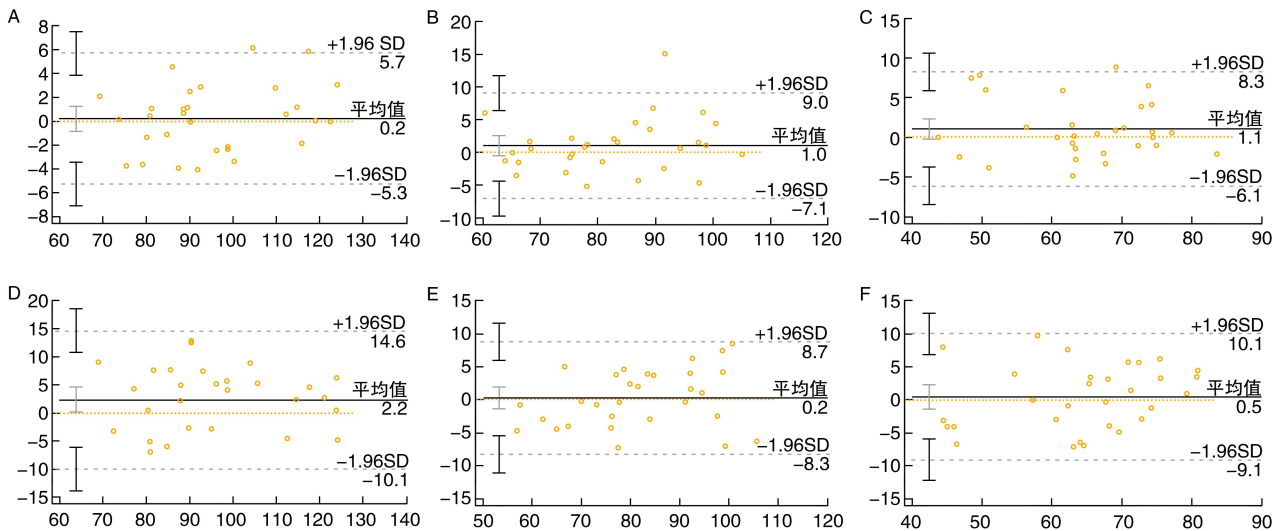


图 5. 颈总动脉 SWE 参数 Bland-Altman 图

A 为 ME_{max} 观察者间差异, B 为 ME_{mean} 观察者间差异, C 为 ME_{min} 观察者间差异, D 为 ME_{max} 观察者内差异, E 为 ME_{mean} 观察者内差异, F 为 ME_{min} 观察者内差异。

Figure 5. Bland-Altman plots of SWE parameters in the common carotid artery

3 讨论

截至 2022 年,全球 CKD 的患病率为 10% [9]。CKD 合并 CVD 的发病率逐年攀升。CKD 患者发生 CVD 或因 CVD 导致死亡的风险,甚至高于其进展为终末期肾病的风险 [10]。因此,早期监测动脉粥样硬化进程,对于预防尿毒症患者并发 CVD 具有重要

的意义。目前,临床上常规采用测量 IMT 作为血管结构变化的标志物及 CVD 的预测因子,然而,IMT 的改变相较于血管壁弹性功能的改变出现较晚,时效性不佳。为了进一步提升尿毒症患者早期动脉病变的检出率,迫切需要一项新技术为临床提供有效的数据支持。

SWE 是一种用于评估生物组织硬度的新技术。

颈动脉位置表浅且固定,检查过程便捷,同时其在反映全身动脉粥样硬化程度方面具有代表性^[6-7],因此可作为全身动脉状况的检查窗口。已有 Maksuti 等^[11]学者将 SWE 评估颈动脉弹性的结果与机械检测颈动脉弹性的结果进行对比,结果显示 SWE 技术与机械检测技术在结果上具有高度一致性。Ucar 等^[12]学者将 SWE 技术应用于大动脉炎患者的颈动脉弹性评估。李希娅等^[13]研究人员将 SWE 技术应用于评估不同程度酒精性脂肪肝患者颈动脉硬化的程度,结果显示,即便是轻度脂肪肝, SWE 也能有效反映颈动脉弹性的变化。

动脉粥样硬化是一种慢性炎症性疾病,其特征是 LDLC 的积累和动脉炎^[14]。在本研究中,与健康对照组相比,尿毒症患者 TC、TG、LDLC、BUN、SCr、BUA、IMT 及 β 升高, HDLC 降低。这是由于尿毒症患者常伴有脂质代谢紊乱^[3-4],导致 TC、TG、LDLC 水平高于健康对照组,而 HDLC 水平低于健康对照组。此外,长期血液透析引发的血管炎症和血管内皮细胞损伤^[15-17],使得动脉内皮细胞的黏附分子表达增加,内皮细胞通透性增强,单核细胞迁移至内膜下的概率上升。内膜下的单核细胞进一步分化为巨噬细胞,大量摄取并积累脂质,转化为泡沫细胞,从而加速动脉粥样硬化的进程,最终导致 β 和 IMT 升高^[14,18]。同时,尿毒症患者体内蓄积的非脂类代谢物,如 BUA^[19],可通过刺激内皮细胞 NADPH 氧化酶,增加 ROS 的生成量,从而引发体内氧化应激;此外, BUA 还能介导内皮细胞表面黏附分子的表达,产生炎症反应,进而加速动脉粥样硬化的进程。尿毒症患者相较于正常人,更易出现动脉结构和功能的改变,且合并 CVD 的风险显著增加。因此,有效改善尿毒症患者的脂质代谢,并清除血清中的代谢物,显得尤为重要。

血液灌流是通过血液与高吸附树脂材料直接接触的血液净化方式,其对中大分子的溶质清除率优于以对流和弥散为原理的血液透析^[20-21]。在本研究中,血液透析联合血液灌流组 BUN、SCr、BUA、TC、TG 及 LDLC 指标均较单纯血液透析组显著降低,进一步说明了血液透析联合血液灌流较单独使用血液透析更能高效地清除尿毒症患者体内的代谢物。本研究分别采用常规超声和 SWE 技术评估健康对照组与尿毒症患者,以及仅接受血液透析与血液透析联合血液灌流治疗的尿毒症患者颈动脉的差异。结果显示,常规超声通过测量 IMT 和 β 值仅能评估尿毒症患者与健康对照组颈动脉的差异,但无法评估不同血液净化方式对尿毒症患者颈动

脉的影响。相比之下, SWE 不仅能准确、定量地评估尿毒症患者与健康对照组颈动脉弹性功能的差异,还能更有效地评价血液透析联合血液灌流治疗对尿毒症患者颈动脉弹性的影响。此外, SWE 参数的 AUC 均高于常规超声参数。采用 SWE 参数 ME_{max} 、 ME_{mean} 、 ME_{min} 诊断单纯血液透析与血液透析联合血液灌流治疗尿毒症患者颈动脉弹性差异的截断值分别为 99.70 kPa、84.14 kPa、70.44 kPa。据此笔者认为,若仅采用血液透析的患者颈动脉弹性模量值超过上述截断值,则提示其相较于血液透析联合血液灌流治疗的尿毒症患者,血管内皮功能障碍更为显著,且动脉粥样硬化的风险更高。这一发现对于指导临床是否需要早期进行干预治疗以及调整血液净化方案具有重要意义; SWE 各参数与 IMT、 β 、LDLC 均呈正相关,与 HDLC 呈负相关,进一步证实 SWE 用于定量评估动脉弹性结果与 IMT、 β 、LDLC、HDLC 上述临床常用于监测动脉粥样硬化风险的指标关联性较好。

本研究也存在一定局限性:① SWE 受呼吸运动和动脉搏动的影响,因此对操作者的手法技巧和患者的配合程度有较高要求;② 本研究属于单中心研究,患者样本量较小。为获取更为精确的截断值,未来需要扩大样本量以进行深入研究。

综上所述, SWE 可以定量评估血液灌流对尿毒症血液透析患者颈动脉弹性的影响。

[参考文献]

- [1] WOUK N. End-stage renal disease: medical management[J]. Am Fam Physician, 2021, 104(5): 493-499.
- [2] KADATANE S P, SATARIANO M, MASSEY M, et al. The role of inflammation in CKD[J]. Cells, 2023, 12(12): 1581.
- [3] NAGAYAMA D, WATANABE Y, YAMAGUCHI T, et al. Relationship of serum lipid parameters with kidney function decline accompanied by systemic arterial stiffness: a retrospective cohort study [J]. Clin Kidney J, 2023, 16(11): 2289-2298.
- [4] MENCARELLI F, AZUKAITIS K, KIRCHNER M, et al. Dyslipidemia in children with chronic kidney disease-findings from the cardiovascular comorbidity in children with chronic kidney disease (4C) study[J]. Pediatr Nephrol, 2024, 39(9): 2759-2772.
- [5] 乔莞宁,陈虹印,张 扬. 氧化应激与动脉粥样硬化[J]. 中国动脉硬化杂志, 2023, 31(4): 312-321.
QIAO W N, CHEN H Y, ZHANG Y. Oxidative stress and atherosclerosis[J]. Chin J Arterioscler, 2023, 31(4): 312-321.
- [6] ŞATIROĞLU Ö, KOCAMAN S A, BAYAR N, et al. Carotid and brachial artery intima-media thickness is related to coronary atherosclerotic burden and may also represent high cardiovascular risk in patients with normal coronary angiograms [J]. J Med Ultrason (2001), 2011, 38(4): 187.

- [7] IWAKIRI T, YANO Y, SATO Y, et al. Usefulness of carotid intima-media thickness measurement as an indicator of generalized atherosclerosis: findings from autopsy analysis[J]. *Atherosclerosis*, 2012, 225(2): 359-362.
- [8] 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.
- [9] KOVESDY C P. Epidemiology of chronic kidney disease: an update 2022[J]. *Kidney Int Suppl*, 2022, 12(1): 7-11.
- [10] KEITH D S, NICHOLS G A, GULLION C M, et al. Longitudinal follow-up and outcomes among a population with chronic kidney disease in a large managed care organization [J]. *Arch Intern Med*, 2004, 164(6): 659-663.
- [11] MAK SUTI E, WIDMAN E, LARSSON D, et al. Arterial stiffness estimation by shear wave elastography: validation in phantoms with mechanical testing[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2016, 42(1): 308-321.
- [12] UCAR A K, OZDEDE A, KAYADIBI Y, et al. Increased arterial stiffness and accelerated atherosclerosis in Takayasu arteritis[J]. *Semin Arthritis Rheum*, 2023, 60: 152199.
- [13] 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患者颈总动脉弹性[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.
- [14] BJÖRKEGREN J L M, LUSIS A J. Atherosclerosis: recent developments[J]. *Cell*, 2022, 185(10): 1630-1645.
- [15] ZHANG Z, ZHANG L, DONG X, et al. Copeptin associates with major adverse cardiovascular events in patients on maintenance hemodialysis[J]. *Clin Chim Acta*, 2025, 564: 119937.
- [16] CARMONA A, AGÜERA M L, LUNA-RUIZ C, et al. Markers of endothelial damage in patients with chronic kidney disease on hemodialysis[J]. *Am J Physiol Renal Physiol*, 2017, 312(4): F673-F681.
- [17] 易晔, 王莹, 黄薇, 等. 高通量血液透析对老年维持性血液透析患者微炎症、FGF23 及动脉粥样硬化的影响[J]. *中国老年学杂志*, 2021, 41(22): 5018-5021.
- YI Y, WANG Y, HUANG W, et al. Effects of high flux hemodialysis on microinflammation, FGF23 and atherosclerosis in elderly maintenance hemodialysis patients[J]. *Chin J Gerontol*, 2021, 41(22): 5018-5021.
- [18] LIBBY P. The changing landscape of atherosclerosis[J]. *Nature*, 2021, 592(7855): 524-533.
- [19] 牛晓歌, 张丁丁, 张云, 等. 高血压患者尿酸、总胆固醇与动态动脉硬化指数的关系[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2018, 26(7): 711-714.
- NIU X G, ZHANG D D, ZHANG Y, et al. Relationship between uric acid, total cholesterol and ambulatory arterial stiffness index in hypertensive patient[J]. *Chin J Arterioscler*, 2018, 26(7): 711-714.
- [20] LU W, JIANG G, Shanghai HP-HD Consensus Group. Hemoperfusion in maintenance hemodialysis patients [J]. *Blood Purif*, 2022, 51(10): 803-811.
- [21] YU Y, MA B, GUO C, et al. Biomembrane-mimetic hemoperfusion adsorbent for efficient removal of low-density lipoprotein from hyperlipemia blood[J]. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2022, 110(8): 1956-1967.
- (此文编辑 文玉珊)

(上接第 761 页)

- [55] ALVAREZ C, RAMIREZ-CAMPILLO R, RAMIREZ-VELEZ R, et al. Effects of 6-weeks high-intensity interval training in school children with insulin resistance: influence of biological maturation on metabolic, body composition, cardiovascular and performance non-responses[J]. *Front Physiol*, 2017, 8: 444.
- [56] MAŁKOWSKA P, SAWCZUK M. Cytokines as biomarkers for evaluating physical exercise in trained and non-trained individuals: a narrative review[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(13): 11156.
- [57] HUANG S C, WONG M K, LIN P J, et al. Short-term intensive training attenuates the exercise-induced interaction of mono-1/2 cells and platelets after coronary bypass in cardiac patients[J]. *Thromb Haemost*, 2017, 117(9): 1761-1771.
- [58] JIN X, YANG S, LU J, et al. Small, dense low-density lipoprotein-cholesterol and atherosclerosis: relationship and therapeutic strategies[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 8: 804214.
- [59] SACKETT J R, FARRELL D P, NAGELKIRK P R. Hemostatic adaptations to high intensity interval training in healthy adult men [J]. *Int J Sports Med*, 2020, 41(12): 867-872.
- [60] ATAKAN M M, GUZEL Y, SHRESTHA N, et al. Effects of high-intensity interval training (HIIT) and sprint interval training (SIT) on fat oxidation during exercise: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Br J Sports Med*, 2022, 56(17): 988-996.
- [61] ÁLVAREZ C, RAMÍREZ-CAMPILLO R, RAMÍREZ-VÉLEZ R, et al. Metabolic effects of resistance or high-intensity interval training among glycemic control-nonresponsive children with insulin resistance[J]. *Int J Obes (Lond)*, 2018, 42(1): 79-87.
- [62] RHIBI F, ZOUHAL H, LIRA F S, et al. Inflammatory cytokines and metabolic responses to high-intensity intermittent training: effect of the exercise intensity [J]. *Biol Sport*, 2022, 39(2): 263-272.
- [63] WRONKA M, KRZEMIN'SKA J, MŁYNARSKA E, et al. The influence of lifestyle and treatment on oxidative stress and inflammation in diabetes[J]. *Int J Mol Sci*, 2022, 23(24): 15743.
- [64] BLANN A D, BROWN JE, HEITMAR R. Metabolism, endothelial and platelet markers in diabetes and cardiovascular disease[J]. *Br J Biomed Sci*, 2022, 79: 10313.
- [65] YUN S H, SIM E H, GOH R Y, et al. Platelet activation: the mechanisms and potential biomarkers[J]. *Biomed Res Int*, 2016, 2016: 9060143.
- (此文编辑 许雪梅)