

颈动脉脉搏波速度评估高血压肾病患者肾损伤的应用价值

王 赞¹, 米亚茹¹, 王媛媛², 邓荷萍^{1*}

(1.河北医科大学第三医院超声科,河北 石家庄 050051;2.河北医科大学第三医院肾内科,河北 石家庄 050051)

[摘要] 目的 探讨脉搏波速度(pulse wave velocity, PWV)在评估高血压肾病患者肾功能不全中的应用潜力。方法 选取慢性高血压肾病患者60例、无肾损害高血压患者60例及健康对照体检者30例的临床数据。收集的人口统计学特征和实验室指标,包括血压、空腹血糖(fasting plasma glucose, FPG)、三酰甘油(triglycerides, TG)、总胆固醇(total cholesterol, TC)、低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)等参数,通过UFI超声技术测定的颈动脉搏动波速度(BS-PWV和ES-PWV),并比较不同组别之间的差异性。结果 高血压组、高血压肾损伤组的SBP、DBP、FPG、TG、TC、LDL-C均高于健康对照组, HDL-C低于健康对照组($P < 0.05$),高血压组与高血压肾损伤组的SBP、DBP、FPG、TG、TC、LDL-C及HDL-C比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。健康对照组与高血压组肾脏滤过率比较差异无统计学意义($P < 0.05$),高血压肾损伤组肾脏滤过率高于健康对照组与高血压组($P < 0.05$)。高血压组、高血压肾损伤组BS-PWV、ES-PWV均高于健康对照组,高血压肾损伤组BS-PWV、ES-PWV均高于高血压组($P < 0.05$)。Pearson相关性分析结果显示随着肾小球滤过率的降低,BS-PWV和ES-PWV逐渐升高($P < 0.001$)。结论 PWV作为无创性诊断指标,其与肾小球滤过率的关联性显著,在监测和预测高血压患者肾脏损害、尤其是对高血压肾病的预防方面, PWV表现出显著的临床相关性。

[关键词] 肾功能不全;高血压;颈动脉脉搏波;肾小球滤过率 doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2025.03.003

[中图分类号] R692.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1007-3205(2025)03-0261-06

Application value of carotid artery pulse wave velocity in assessing renal damage in patients with hypertensive nephropathy

WANG Yun¹, MI Ya-ru¹, WANG Yuan-yuan², DENG He-ping^{1*}

(1. Department of Ultrasound, the Third Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050051, China; 2. Department of Nephrology, the Third Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050051, China)

[Abstract] **Objective** To explore the application potential of pulse wave velocity (PWV) measurement in evaluating renal dysfunction in patients with hypertensive nephropathy (HN). **Methods** Clinical data of 60 patients with chronic HN, 60 patients with hypertension but without kidney damage, and 30 healthy control subjects who underwent physical examinations were selected. The demographic characteristics and laboratory indicators, including blood pressure, fast plasma glucose (FPG), triglycerides (TG), total cholesterol (TC), low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C), and other parameters, were collected. UFI ultrasound technology was used to determine carotid PWV [beginning of systole PWV (BS-PWV) and end of systole PWV (ES-PWV)], and the differences

[收稿日期]2024-11-21

[基金项目]河北省医学科学研究课题计划(20230714)

[作者简介]王赞(1986-),女,河北石家庄人,河北医科大学第

三医院主治医师,医学硕士,从事实体器官超声介入研究。

* 通信作者。E-mail:dengheping@aliyun.com

between different groups were compared. **Results** The SBP, DBP, FPG, TG, TC, and LDL-C of the hypertension group and hypertensive kidney injury group were higher than those of the healthy control group, while HDL-C was lower than that of the healthy control group ($P < 0.05$). There was no significant difference in SBP, DBP, FPG, TG, TC, LDL-C, and HDL-C between the hypertension group and hypertensive kidney injury group ($P > 0.05$). There was no significant difference in renal filtration rate between the healthy control group and the hypertension group ($P < 0.05$), while the renal filtration rate in the hypertensive kidney injury group was higher than that in the healthy control group and the hypertension group ($P < 0.05$). The BS-PWV and ES-PWV were higher in the hypertension group and hypertensive kidney injury group than in the healthy control group, and higher in the hypertensive kidney injury group than in the hypertension group ($P < 0.05$). The Pearson correlation analysis results showed that as the glomerular filtration rate decreased, BS-PWV and ES-PWV gradually increased ($P < 0.001$). **Conclusion** PWV serves as a non-invasive diagnostic indicator, demonstrating a strong association with glomerular filtration rate. Its clinical implications in monitoring and predicting renal damage in hypertensive individuals, particularly in the prevention of HN, are found to be substantial.

[**Key words**] renal dysfunction; hypertension; carotid pulse wave; glomerular filtration rate

高血压性肾损害是一种由长期高血压诱发的慢性肾脏疾病,表现为肾功能逐步恶化及轻微蛋白尿,是继发性肾病的典型范例^[1]。据报道,高血压已成为全球肾衰竭的主要驱动因素之一,其发病率持续攀升^[2]。目前评估高血压所致肾功能损伤主要依赖蛋白尿和尿液肌酐水平测定,但这些指标在揭示病情的特异性和严重性方面存在局限性^[3]。肾活检虽在诊断、预后评估及治疗规划中具有决定性作用,但其侵入性使患者面临潜在风险^[4]。因此,寻找非侵入性替代方法以有效评估肾脏损伤、提升诊断精确性并减少活检需求,已成为临床研究的迫切课题。高血压相关肾损伤的病理基础表现为小动脉张力负荷增加,导致血管腔狭窄,进而引发肾实质缺血、肾小球纤维化及小动脉硬化^[5],且血压异常波动与这些功能和结构改变密切相关。动脉僵硬度的早期识别在预防高血压肾损伤中至关重要,尤其对于高风险患者。脉搏波速度(pulse wave velocity, PWV)作为评估动脉僵硬度的无创“黄金标准”,通过测量压力波在动脉中的传播速度反映血管硬度,具有简易、可靠和可重复的特点^[6],但其在高血压相关肾病评估中的效能尚需进一步验证。本研究通过 UF 技术探讨 PWV 与高血压肾病之间的关联性,旨在评估 PWV 作为预测肾脏损伤指标的潜力,最终为高血压肾病的诊断提供更便捷、精确地途径,从而改善患者的预后评估和临床管理,具有深远实践意义。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取 2021 年 1 月—2023 年 12 月于河北医科大学第三医院就诊并被确诊为高血压患者 120 例,其中慢性高血压伴肾损伤 60 例,慢性高血压无肾损伤 60 例。选取同时期在体检中心的健康体检者 30 例作为健康对照组。

本研究经医院伦理委员会批准(W2023-021-1),所有研究对象均知情同意且签署知情同意书。

1.2 纳入标准与排除标准 纳入标准:①慢性高血压肾损伤组,由确诊的原发性高血压病例组成,具有超过 5 年的高血压病史,并展现出慢性肾损伤的临床特征,且在未经治疗的情况下出现肾脏功能障碍的新诊断个案;②高血压无肾损伤组,满足原发性高血压诊断,且在 5 年以上的高血压史背景下,肾功能维持正常;③健康对照组,表现为心电图与血压指标正常,且无糖尿病、高血脂、高血压或心绞痛等相关病史;④所有受试者需进行详尽的实验室检测。排除标准:①严重心血管、脑血管或肺部疾病,如急性心肌梗死、Ⅲ级及以上纽约心脏协会定义的严重充血性心力衰竭、中风、慢性阻塞性肺疾病等;②伴随原发性肾病、梗阻性泌尿系统疾病、慢性肾盂肾炎等;③其他自身免疫性疾病,如类风湿关节炎;④近 1 个月内有急性感染病史;⑤恶性肿瘤病史;⑥血液病或凝血机制异常;⑦周围血管疾病,如下肢深静脉血栓形成;⑧妊娠状态。

1.3 诊断标准 高血压病的诊断标准:参照《中国高血压防治指南》(2018 修订版)中的诊断标准:非同日 3 次测量血压,收缩压(systolic blood pressure, SBP) ≥ 140 mmHg (1 mmHg = 0.133 kPa)和(或)舒张压(diastolic blood pressure, DBP) ≥ 90 mmHg。按美国肾脏病基金会提出的慢性肾脏病分期标准进行分组:肾功能(glomerular filtration rate, GFR)正常组:GFR ≥ 90 mL \cdot min⁻¹ \cdot 1.73 m⁻²表示肾功能正常;肾功能轻度受损组:GFR 60~<90 mL \cdot min⁻¹ \cdot 1.73 m⁻²表示肾功能轻度受损;肾功能中度组:GFR < 60 mL \cdot min⁻¹ \cdot 1.73 m⁻²表示肾功能中度受损;肾功能重度组:GFR < 30 mL \cdot min⁻¹ \cdot 1.73 m⁻²表示肾功能重度受损^[7]。

1.4 研究指标 记录所有入选患者基本信息,包括性别、年龄、体重指数(body mass index, BMI)、吸烟史、饮酒史等资料。所有患者使用同一测量仪, BMI = 体重/身高²。吸烟史:入院前平均每日吸烟量 ≥ 1 支,并且持续时间 > 6 个月;饮酒史入院前平均每周饮酒量 ≥ 100 g,并且持续时间 > 1 年^[8]。

1.5 实验室检测 测定患者的 SBP、DBP、空腹血糖(fasting plasma glucose, FPG)、三酰甘油(triglycerides, TG)、总胆固醇(total cholesterol, TC)、高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、肾小球滤过率等生化指标。

1.6 颈动脉脉搏波超声测定 采用床旁彩色多普勒超声诊断仪,配有 UF 功能, SL10-2 探头,频率 2~10 MHz。能量超声评估颈动脉 PWV。测量 PWV 时选取颈总动脉长轴切面,调整探头使血管壁平直,清晰显示管壁内中膜,避免管壁前方有甲状腺及颈静脉等结构,避免探头加压,被检查者保持屏气且不做吞咽动作,在脉搏波成像模式下,获得收缩期开始时脉搏波传导速度(BS-PWV)及收缩期结束时脉搏波传导速度(ES-PWV),其中 Δ 为标准差,以 $\Delta < 20\%$ BS 或 ES 为有效数据,所有数据均连续测量 3 次取平均值。

1.7 生物信息学分析 实验样本划分为单纯高血压组及高血压伴随肾损伤组。运用 R 语言 4.1.0 版本及 Limma R 包,对数据集执行统计显著性分析,绘制出的火山图揭示了表达水平的显著差异。差异表达的阈值判定为 log₂ Fold Change 绝对值 > 1 ,且

P 值 < 0.05 。进一步地,对这些差异基因集实施了基因本体(Gene ontology, GO)和京都基因与基因组百科全书(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG)的富集分析,随之将结果以图形方式展现,从而洞察 GO 和 KEGG 通路的分布特征。

1.8 统计学方法 应用 SPSS 27.0 统计软件分析数据。计量资料比较采用单因素方差分析和 SNK- q 检验;计数资料比较采用 χ^2 检验,相关性检验采用 Pearson 相关性分析。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 生物信息学分析 在本研究中,实验样本被划分为高血压类别与高血压引发的肾损伤子集。运用 R 编程语言的 4.1.0 版本及其中的 Limma 软件包,对收集的数据集执行了差异表达分析,筛选标准设定阈值 $|\log_2 FC| > 1$ 和 $P < 0.05$ 。借助 ggplot2 R 包,构建了一张火山图(图 1A),清晰地展示了差异表达谱:观察到 133 个上调的显著性标记,特别是与 PWV 的关联,同样另有 378 个数据点差异显著但无统计学意义($P > 0.05$),包括 SBP、DBP、FPG、TG、TC、LDL-C、HDL-C 等参数。

进一步对这些差异表达谱进行了深入的生物信息学解析。首先,借助 GO 富集分析和 KEGG 路径分析。利用 DAVID 在线平台,对差异基因执行了 GO 和 KEGG 富集分析。GO 富集注释将差异基因划分为生物过程(biological process, BP)、细胞组件(cell component, CC)和分子功能(molecular function, MF)三大类别。GOplot 与 ggplot2 R 包的集成增强了 GO 通路富集结果的可视化(图 1B),突出 ncRNA 代谢、mRNA 代谢及 RNA 代谢等核心生物过程的显著富集。

KEGG 分析则凸显了内质网蛋白质处理、内吞作用和细胞周期等关键通路的富集,这些结果以条形图(图 1C)和散点图(图 1D)形式呈现。还采用 cnetplot R 包构建了一个基因概念网络图(图 1E),揭示了在不同 KEGG 通路间交互的基因网络,从而为理解这些差异表达基因在生物通路中的作用提供了全面视图。

2.2 各组一般资料的比较 3 组性别、年龄、BMI、吸烟史、饮酒史比较差异均无统计学意义($P > 0.05$),见表 1。

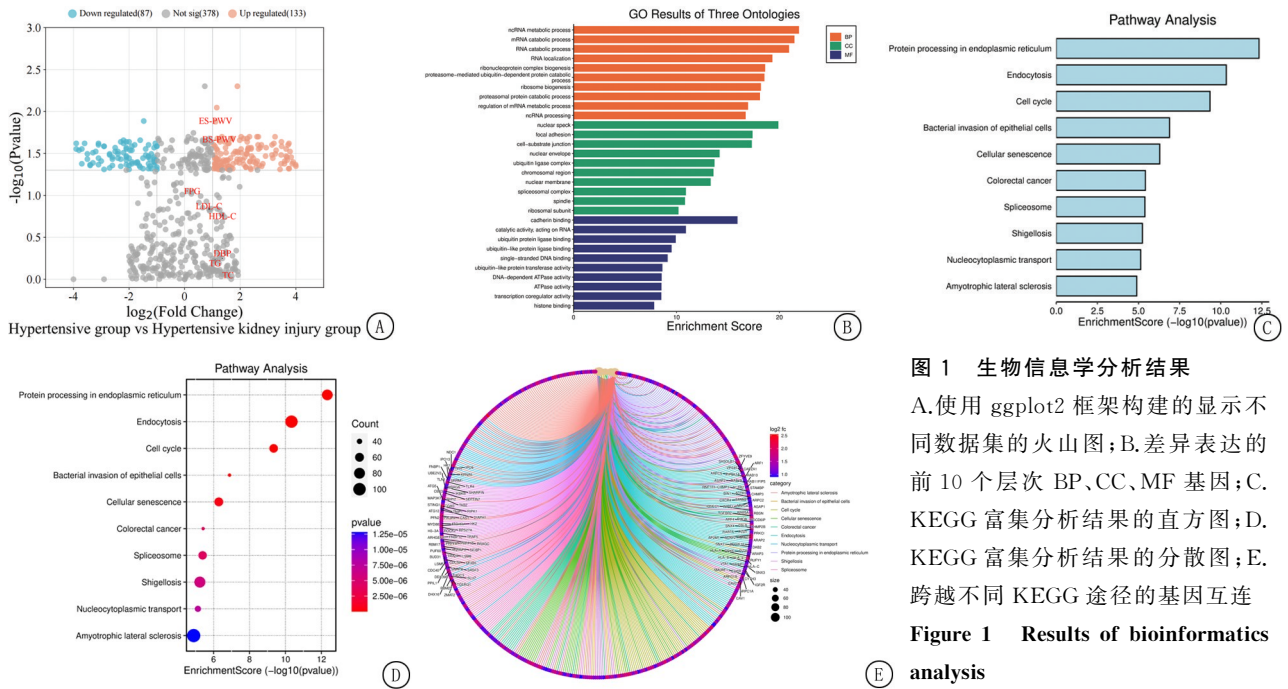


图1 生物信息学分析结果

A.使用 ggplot2 框架构建的显示不同数据集的火山图; B.差异表达的前10个层次 BP、CC、MF 基因; C. KEGG 富集分析结果的直方图; D. KEGG 富集分析结果的分散图; E. 跨越不同 KEGG 途径的基因互连

Figure 1 Results of bioinformatics analysis

表1 各组间一般资料的比较

Table 1 Comparison of general data among groups

组别	例数	男性 (例数, %)	年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)	BMI($\bar{x} \pm s$)	吸烟 (例数, %)	饮酒 (例数, %)
健康对照组	30	17(56.67)	53.40 ± 9.91	25.66 ± 2.80	10(33.33)	8(26.67)
高血压组	60	35(58.33)	53.82 ± 9.16	26.48 ± 3.05	25(41.67)	21(35.00)
高血压肾损伤组	60	36(60.00)	54.05 ± 9.53	25.69 ± 4.25	28(46.67)	23(38.33)
χ^2/F 值		0.096	0.047	0.919	1.464	1.207
<i>P</i> 值		0.953	0.954	0.401	0.481	0.557

2.3 各组间实验室指标比较 高血压组、高血压肾损伤组的 SBP、DBP、FPG、TG、TC、LDL-C 均高于健康对照组, HDL-C 低于健康对照组, 差异有统计

学意义($P < 0.05$), 高血压组与高血压肾损伤组的 SBP、DBP、FPG、TG、TC、LDL-C 及 HDL-C 比较差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表2。

表2 各组间实验室指标比较分析

Table 2 Comparison of laboratory parameters among groups

组别	样本量	SBP (mmHg)	DBP (mmHg)	FPG (mmol/L)	TG (mmol/L)	TC (mmol/L)	HDL-C (mmol/L)	LDL-C (mmol/L)
健康对照组	30	120.57 ± 11.32	74.54 ± 8.61	5.15 ± 0.67	1.35 ± 0.18	4.20 ± 0.68	1.47 ± 0.25	2.65 ± 0.74
高血压组	60	144.03 ± 10.01 *	92.53 ± 7.81 *	5.76 ± 0.51 *	1.54 ± 0.36 *	4.65 ± 0.72 *	1.22 ± 0.25 *	3.00 ± 0.76 *
高血压肾损伤组	60	142.98 ± 11.18 *	90.70 ± 7.04 *	5.92 ± 0.51 *	1.53 ± 0.32 *	4.59 ± 0.68 *	1.26 ± 0.28 *	3.08 ± 0.78 *
<i>F</i> 值		54.762	63.074	19.986	4.163	4.385	9.778	3.289
<i>P</i> 值		<0.001	<0.001	<0.001	0.018	<0.001	<0.001	0.040

* *P* 值 < 0.05 与健康对照组比较(SNK-*q* 检验)

2.4 各组间肾小球滤过率与颈动脉脉搏波检测结果比较 健康对照组与高血压组肾脏滤过率比较差异无统计学意义($P < 0.05$), 高血压肾损伤组肾脏滤过率低于健康对照组与高血压组, 差异有统计学意义($P < 0.05$)。高血压组、高血压肾损伤组 BS-PWV、ES-PWV 均高于健康对照组, 高血压肾损伤组 BS-PWV、ES-PWV 均高于高血压组, 差异有统

计学意义($P < 0.05$)。见表3。

2.5 高血压肾损伤与颈动脉脉搏波检测结果相关性分析 高血压肾损伤组中, Pearson 相关性分析结果显示随着肾小球滤过率的降低, BS-PWV 和 ES-PWV 逐渐升高, BS-PWV 和 ES-PWV 与肾小球滤过率呈负相关($r = -0.732, r = -0.769, P < 0.001$)。见图2。

表3 组间肾小球滤过率和颈动脉脉搏波检测结果的比较评估

Table 3 Comparative evaluation of detection results of glomerular filtration rate and carotid artery pulse wave among groups

($\bar{x} \pm s$)

组别	样本量	肾小球滤过率 ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot 1.73 \text{ m}^{-2}$)	BS-PWV(s/m)	ES-PWV(s/m)
对照组	30	101.50 ± 6.50	5.65 ± 0.79	7.65 ± 1.44
高血压组	60	97.50 ± 5.09	6.74 ± 1.34 *	9.61 ± 1.79 *
高血压肾损伤组	60	59.33 ± 14.14 * #	7.67 ± 1.54 * #	10.58 ± 2.11 * #
F 值		285.531	23.066	24.297
P 值		<0.001	<0.001	<0.001

* P 值 < 0.05 与健康对照组比较 # P 值 < 0.05 与高血压组比较 (SNK-q 检验)

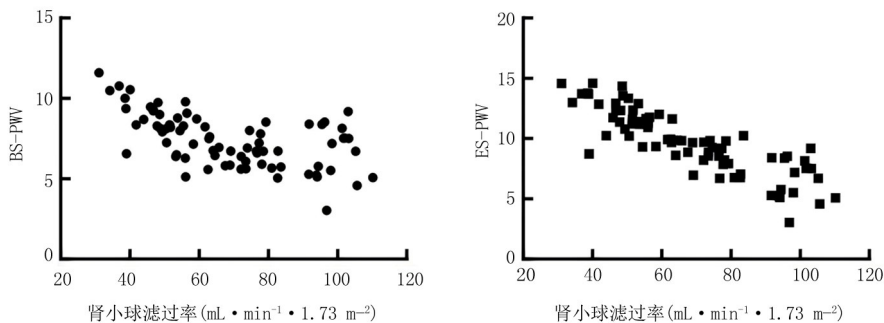


图2 高血压肾损伤组肾小球滤过率与PWV之间的关联

Figure 2 The correlation between glomerular filtration rate and PWV in hypertensive kidney injury group

3 讨 论

高血压作为一种全球普遍的公共卫生问题,其高患病率不容忽视,据统计,20岁及以上成年人群中近半数个体受其困扰,依据世界卫生组织的数据,收缩压/舒张压超过130/80 mmHg的个体比比皆是^[9]。高血压并发症每年致使近千万人丧生,其中,高血压肾病常被忽视,因其早期常无明显症状,高血压肾病是导致终末期肾病(end-stage renal disease, ESRD)的主要原因之一,仅次于糖尿病肾病^[10]。持续的高血压状态通常导致肾功能不全,进而加剧纤维化进程,最终诱发慢性肾功能衰竭^[11]。无论高血压的初始病因为何,一旦发生高血压肾损伤、肾硬化、高血压伴进行性肾损伤的循环都会发生^[12]。

高血压引发的血管重构和内皮功能障碍,表现为内皮功能障碍和血管重塑,涉及小动脉与大动脉,导致血管系统阻力增加,动脉硬化的风险也随之上升,加剧血管老化现象。颈动脉内膜中层厚度(carotid intima-media thickness, CIMT)、PWV、增强指数及内皮功能障碍等生物标记物,均与未来心血管事件风险预测相关^[13]。无创性检查如PWV的测量,对于评估血管损伤至关重要,其中颈动脉股动脉PWV是诊断动脉硬化的金标准^[14]。研究^[15]显示,PWV每增加1 m/s,心血管事件风险上升14%~15%,进一步证实了心血管病死率的关联性。近期研究观察到,与健康对照组对比,高血压患

者表现出全身血管硬度的增加,具体体现为ulPWV和baPWV的显著增长,尤其是小动脉,其变化与高血压的严重度高度相关^[16]。大学生高血压风险因素的调查同样揭示,PWV的增加与高血压的发病差异具有统计学上的显著关联^[17]。在本研究中,高血压组的BS-PWV和ES-PWV数值均显著高于正常对照组,并与血压值正相关,与预期的病理生理学一致^[18]。

心血管疾病与肾脏健康的关系错综复杂,高血压患者常伴发肾损伤,可能源于长期的高血压,导致局灶性缺血性肾小球/肾单位损失,尤其在小动脉肾硬化的情况下,长期高血压导致的肾小动脉和小球损伤,伴有小动脉坏死和管型形成,特别是当血压超出自身调节范围时^[12,18],因此高血压引发的肾损伤是血管对持续血压升高的响应^[19-20]。动脉僵硬度的加剧与肾功能的恶化成正比,同时,肾素-血管紧张素-醛固酮系统(renin-angiotensin-aldosterone system, RAAS)的激活进一步加剧了这一恶性循环,改变入球小动脉和出球小动脉的阻力,导致动脉僵硬度的持续升级^[21-23]。有研究^[24]显示,在慢性肾损伤的发展过程中,PWV与慢性肾损伤的分期显示出明显的等级性增长,尤其在慢性肾脏病中,肾功能的衰退与大动脉僵硬度的增加互为因果。本研究揭示,PWV与高血压相关性肾损伤的严重性正相关,当高血压患者的ES-PWV超过10 m/s时,应高度警觉肾脏状况,预防性的干预对抵抗高血压肾

损伤至关重要。

综上所述,PWV 作为无创检测手段,不仅反映动脉弹性与硬化程度,还为高血压患者提供了对肾损伤风险的评估与预测,尤其在预防高血压肾损伤方面具有积极的预后价值。

[参考文献]

- [1] Wang C, Wang Z, Zhang W. The potential role of complement alternative pathway activation in hypertensive renal damage [J]. *Exp Biol Med* (Maywood), 2022, 247(9): 797-804.
- [2] Sullivan JC, Gillis EE. Sex and gender differences in hypertensive kidney injury[J]. *Am J Physiol Renal Physiol*, 2017, 313(4): F1009-F1017.
- [3] Chen C, Lu C, Qian Y, et al. Urinary miR-21 as a potential biomarker of hypertensive kidney injury and fibrosis[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 17737.
- [4] Sunbul M, Gerin F, Durmus E, et al. Neutrophil to lymphocyte and platelet to lymphocyte ratio in patients with dipper versus non-dipper hypertension [J]. *Clin Exp Hypertens*, 2014, 36(4): 217-221.
- [5] 朱丹,南娜佳,陈槐槐.动脉硬化指数与血清 Smad1 水平与高血压肾损伤患者肾功能转归的相关性[J]. *中国卫生检验杂志*, 2023, 33(13): 1613-1616.
- [6] 王宏宇,刘金波,赵红薇,等.高血压患者动脉僵硬度与血脂的相关性研究[J]. *中国全科医学*, 2014, 17(18): 2070-2073.
- [7] 陈玉莲.中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白、抗磷脂酶 A2 受体抗体表达及尿视黄醇结合蛋白水平与慢性肾脏病的关系[J]. *中华养生保健*, 2024, 42(16): 39-42.
- [8] 孙赞,陈春伟,王雷,等.盐摄入量对不同盐敏感性高血压患者反应性充血指数及颈-股动脉脉搏波传导速度的影响[J]. *中华高血压杂志*, 2024, 32(3): 243-250.
- [9] Wang Z, Wang S, Zhao J, et al. Naringenin ameliorates renovascular hypertensive renal damage by normalizing the balance of renin-angiotensin system components in rats[J]. *Int J Med Sci*, 2019, 16(5): 644-653.
- [10] Webster AC, Nagler EV, Morton RL, et al. Chronic kidney disease[J]. *Lancet*, 2017, 389(10075): 1238-1252.
- [11] Sequeira-Lopez MLS, Gomez RA. Renin cells, the kidney, and hypertension[J]. *Circ Res*, 2021, 128(7): 887-907.
- [12] Owoicho Orgah J, Wang M, Yang X, et al. Danhong injection protects against hypertension-induced renal injury via down-regulation of myoglobin expression in spontaneously hypertensive rats[J]. *Kidney Blood Press Res*, 2018, 43(1): 12-24.
- [13] Márquez DF, Rodríguez-Sánchez E, de la Morena JS, et al. Hypertension mediated kidney and cardiovascular damage and risk stratification: Redefining concepts[J]. *Nefrologia (Engl Ed)*, 2022, 42(5): 519-530.
- [14] Van Bortel LM, Laurent S, Boutouyrie P, et al. Expert consensus document on the measurement of aortic stiffness in daily practice using carotid-femoral pulse wave velocity[J]. *J Hypertens*, 2012, 30(3): 445-448.
- [15] Vlachopoulos C, Aznaouridis K, Stefanadis C. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with arterial stiffness: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2010, 55(13): 1318-1327.
- [16] Wang J, Jing C, Hu X, et al. Assessment of aortic to peripheral vascular stiffness and gradient by segmented upper limb PWV in healthy and hypertensive individuals[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 19859.
- [17] Ji X, Zhao H, Wang M, et al. Study of correlations between metabolic risk factors, PWV and hypertension in college students[J]. *Clin Exp Hypertens*, 2020, 42(4): 376-380.
- [18] Stanchev S, Kotov G, Landzhov B, et al. Depletion of vascular adaptive mechanisms in hypertension-induced injury of the heart and kidney[J]. *Bratisl Lek Listy*, 2023, 124(2): 133-142.
- [19] Czopek A, Moorhouse R, Gallacher PJ, et al. Endothelin blockade prevents the long-term cardiovascular and renal sequelae of acute kidney injury in mice[J]. *Sci Transl Med*, 2022, 14(675): eabf5074.
- [20] Franco M, Pérez-Méndez O, Kulthinee S, et al. Integration of purinergic and angiotensin II receptor function in renal vascular responses and renal injury in angiotensin II-dependent hypertension[J]. *Purinergic Signal*, 2019, 15(2): 277-285.
- [21] Kusunoki H, Iwashima Y, Kawano Y, et al. Associations between arterial stiffness indices and chronic kidney disease categories in essential hypertensive patients [J]. *Am J Hypertens*, 2021, 34(5): 484-493.
- [22] Hortmann K, Boutouyrie P, Locatelli JC, et al. Acute effects of high-intensity interval training and moderate-intensity continuous training on arterial stiffness in young obese women[J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2021, 28(7): e7-e10.
- [23] Ji N, Huang Z, Zhang X, et al. Association between egg consumption and arterial stiffness: a longitudinal study[J]. *Nutr J*, 2021, 20(1): 67.
- [24] 谢瑜,罗惠民.非透析的慢性肾脏病患者踝脉搏波传导速度的影响因素[J]. *中国老年学杂志*, 2016, 36(14): 3526-3530.

(本文编辑:何祯)