

• 神经科专栏 •

脑白质病变与脑血流动力学指标的相关性分析

郭晓云¹, 李芳瑜², 李文君¹, 徐玉珠¹, 刘俊艳¹, 王锦阳^{1*}

(1.河北医科大学第三医院神经内科一病区,河北石家庄 050051;2.河北省宁晋县医院内科,河北宁晋 055550)

[摘要] **目的** 探讨脑白质病变(white matter lesions, WML)与脑血流动力学指标(cerebrovascular hemodynamic indices, CVHI)的相关性。**方法** 回顾性纳入2021年10月—2022年12月就诊于河北医科大学第三医院的WML患者158例(轻、中、重度)及非WML者25例,均通过基于脑血管动力模型和理论研发的颈动脉超声—脑动力学检测仪(GT-3000)评估CVHI相关11项参数:平均流量(mean blood flow, Q_{mean})、平均流速(mean blood flow velocity, V_{mean})、最大流速(dilatation capacity)、最小流速(minimum blood flow velocity, V_{min})、脉搏波速(pulse wave velocity, W_v)、特性阻抗(characteristic impedance, Z_{cv})、可扩张度(dilatation capacity, DI)、外周阻力(peripheral resistance, RV)、动态阻力(dynamic resistance, DR)、临界压力(critical pressure, CP)、差压(diastolic pressure difference, DP)。比较WML组与非WML组临床资料,采用Logistic回归分析WML发生的危险因素,比较不同亚组各CVHI参数的差异以及各参数对不同程度WML患者的影响。**结果** Logistic回归分析显示,年龄和收缩压水平与WML发生相关($OR=1.081, 95\%CI:1.012\sim1.155, P=0.021$; $OR=1.040, 95\%CI:1.011\sim1.069, P=0.007$);2组CVHI参数($Q_{mean}, V_{mean}, V_{min}, W_v, Z_{cv}, DI, R_v, DR, CP$)差异有统计学意义($P<0.05$),2组DP差异无统计学意义($P>0.05$)。组间比较轻、中、重度WML组各CVHI参数显示:3组的 $V_{mean}, V_{min}, W_v, Z_{cv}, R_v, CP, DP$ 差异有统计学意义($P<0.05$);多重比较显示:与轻度WML组相比较,中度WML组脑血流量降低($V_{mean}, V_{min}; P<0.05$)、微循环灌注量下降($R_v, CP; P<0.05$),而重度WML组脑血流量、脑血管弹性及微循环灌注量均下降($P<0.05$);与中度WML组相比较,重度WML组在血管壁弹性降低($W_v, Z_{cv}; P<0.05$)。Logistic回归结果显示, V_{min} 与WML严重程度最为显著($OR=2.629, 95\%CI:1.133\sim6.099, P=0.024$)。**结论** 年龄、收缩压水平是WML发生的危险因素;CVHI参数脑血流量、血流速度、脑血管弹性、血管阻力、微循环灌注量均与WML相关,其中脑血流量下降与WML严重程度显著相关,舒张期脑血流量的 V_{min} 是WML严重程度的核心预测指标。

[关键词] 脑白质病;脑血流动力学;脑血流量 doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2025.09.003

[中图分类号] R742 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1007-3205(2025)09-1004-08

Correlation between white matter lesions and cerebrovascular hemodynamic indices

GUO Xiao-yun¹, LI Fang-yu², LI Wen-jun¹, XU Yu-zhu¹, LIU Jun-yan¹, WANG Jin-yang^{1*}

(1.The First Department of Neurology, the Third Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050051, China; 2.Department of Internal Medicine, Ningjin County Hospital, Hebei Province, Ningjin 055550, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the correlation between white matter lesions (WML) and cerebrovascular hemodynamic indices (CVHI). **Methods** A total of 158 patients with WML (mild, moderate, and severe) treated at the Third Hospital of Hebei Medical University between October 2021 and December 2022 and 25 non-WML controls were included. All 11 parameters related to CVHI were evaluated using the carotid artery ultrasound-brain dynamics detector (GT-

[收稿日期]2025-04-16

[基金项目]河北省医学科学研究课题计划(20210737)

[作者简介]郭晓云(1991-),女,河北邯郸人,河北医科大学第

三医院主治医师,医学硕士,从事神经内科疾病诊治研究。

* 通信作者。E-mail:wangjinyang@hebmu.edu.cn

3000), which is based on cerebral vascular dynamic models and theories; mean blood flow (Q_{mean}), mean blood flow velocity (V_{mean}), maximum flow velocity (V_{max}), minimum flow velocity (V_{min}), pulse wave velocity (W_v), characteristic impedance (Z_{cv}), dilatation capacity (DI), peripheral resistance (RV), dynamic resistance (DR), critical pressure (CP), and diastolic pressure difference (DP). The clinical data of WML and non-WML groups were compared, followed by Logistic regression analysis to identify risk factors for WML. Differences in various CVHI parameters among different subgroups and the effects of each parameter on patients with WML of different severities were compared. **Results** Logistic regression analysis showed that age and systolic blood pressure (SBP) levels were associated with the occurrence of WML ($OR = 1.081, 95\%CI: 1.012 - 1.155, P = 0.021$; $OR = 1.040, 95\%CI: 1.011 - 1.069, P = 0.007$). There were significant differences in the CVHI parameters ($Q_{\text{mean}}, V_{\text{mean}}, V_{\text{min}}, W_v, Z_{\text{cv}}, DI, R_v, DR, CP$) between the two groups ($P < 0.05$), while there was no significant difference in DP between the two groups ($P > 0.05$). Intergroup comparisons revealed CVHI parameters, including $V_{\text{mean}}, V_{\text{min}}, W_v, Z_{\text{cv}}, R_v, CP$, and DP, differed among the mild, moderate, and severe WML groups ($P < 0.05$). Multiple comparisons showed that compared with the mild WML group, the moderate WML group had lower cerebral blood flow ($V_{\text{mean}}, V_{\text{min}}$; $P < 0.05$) and microcirculation disturbances ($R_v, CP, P < 0.05$). The severe WML group had reduced cerebral blood flow, vessel wall elasticity, and microcirculation perfusion ($P < 0.05$). Compared with the moderate WML group, the severe WML group had lower vascular elasticity ($W_v, Z_{\text{cv}}, P < 0.05$). The results of the Logistic regression analysis showed that V_{min} was most significantly associated with the severity of WML ($OR = 2.629, 95\%CI: 1.133 - 6.099, P = 0.024$). **Conclusion** Age and SBP levels are risk factors for the occurrence of WML, and CVHI parameters, including cerebral blood flow, blood flow velocity, cerebral vascular elasticity, vascular resistance, and microcirculation perfusion, are involved in WML development. Cerebral blood flow reduction is significantly correlated with WML severity, particularly V_{min} in diastolic cerebral blood flow as a core predictive indicator.

[Key words] leukoencephalopathies; cerebrovascular hemodynamics; cerebral blood flow

脑白质病变(white matter lesions, WML)在颅脑磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)的T2WI和FLAIR序列上表现为脑白质区域中大小不等的高信号,在T1WI序列呈等或者低信号^[1]。WML是脑小血管病最普遍的类型之一,不仅可评估认知障碍、卒中及死亡事件的发生风险^[2-3],且可增加帕金森病的患病风险、加速它的疾病进程^[4-6]。近年来,WML除了影像学上的诊断,脑血流动力学评估成为研究热点。但既往研究缺乏系统比较,本研究基于脑血流动力学指标(cerebrovascular hemodynamic indices, CVHI),通过多参数综合评估WML患者的脑血流动力学变化,旨在阐明WML的脑血流动力学特征,为WML的机制探索及早期识别评估提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取2021年10月—2022年12月

期间就诊于河北医科大学第三医院的WML患者158例以及同期就诊的非WML患者25例为研究对象。排除标准:①颈部彩色多普勒超声提示颈部血管狭窄 $\geq 50\%$;②有严重心脑血管疾病或晚期肿瘤的患者;③影像资料提示脑白质病变呈明显不对称分布的患者以排除单侧严重颈内动脉闭塞对WML影响。

本研究已获得河北医科大学第三医院临床伦理学委员会批准(伦理学审批号:W2021-008-1)。所有参与者均自愿签署知情同意书。

1.2 检查方法

1.2.1 颅脑影像学检查 所有研究对象进行磁共振(西门子,1.5TMRI,Avanto)扫描,序列包括轴位横断面快速梯度回波T1WI、快速自旋回波T2WI、反转恢复序列T2FLAIR、血管MRI。

1.2.2 脑血流动力学检查 通过颈动脉超声—脑动力学检测仪(上海神舟美景健康科技公司,GT-

3000)完成,其工作原理^[7]:5 MHz 超声多普勒流速检测、颈总动脉压力检测、同步心电检测系统传入数据采集系统,包括数字检取超声多普勒信号和 A/D 转换;再传出至计算机分析系统,包括脑血管血液动力学分析专用软件及工业控制用计算机主板、CPU、内存软硬盘驱动器等,将送来的数据计算出所要求的 11 对脑血管血流动力学指标即平均流量(mean blood flow, Qmean)、平均流速(mean blood flow velocity, Vmean)、最大流速(maximum blood flow velocity, Vmax)、最小流速(minimum blood flow velocity, Vmin)、脉搏波速(pulse wave velocity, Wv)、特性阻抗(characteristic impedance, Zcv)、可扩张度(dilatation capacity, DI)、外周阻力(peripheral resistance, RV)、动态阻力(dynamic resistance, DR)、临界压力(critical pressure, CP)、差压(diastolic pressure difference, DP)。由 2 位经过专业训练且操作熟练的神经内科医师操作,分别采集两侧颈总动脉血流和搏动压力相关参数共 11 项,各个参数均取双侧平均值。记录患者一般情况,先检测流速再检测压力。1 位副高及以上的医师审核检查结果和检查报告。

1.3 数据收集 收集研究对象的基本临床资料,包括性别、年龄、身高、体重、吸烟史、饮酒史、高血压病、糖尿病、脑血管病、家族史以及实验室资料。实验室检查指标主要包括三酰甘油、胆固醇、低密度脂蛋白和同型半胱氨酸水平。

1.4 评分及分组方法 影像诊断 WML 的患者采用 Fazekas 直观评分量表^[8]对脑室旁白质和深部白质分别进行评分,标准为脑室周围白质高信号:无(0 分);帽状或铅笔细样线状(1 分);平滑的晕带(2 分);延伸至深部白质的不规则脑室周围高信号(3

分)。深部白质高信号:无(0 分);点状病灶(1 分);病灶开始融合(2 分);大面积的融合(3 分)。分别对脑室周围及深部白质高信号进行评分,将两部分分数相加。依据这两部分分数之和,将 WML 患者分为 3 组:轻度病变 1~2 分,中度病变 3~4 分,重度病变 5~6 分。所有影像图像均由 2 名神经内科主治医师及以上进行评估,评分前 2 名医生均接受过培训且评估结果通过一致性检验。

1.5 统计学方法 应用 SPSS 25.0 统计软件分析数据。符合正态分布的计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示,比较应用独立样本 *t* 检验或方差分析,对于三组计量资料,方差齐多重比较用最小显著差异(least significant difference, LSD)检验,方差不齐多重比较用塔姆黑尼检验;非正态分布的计量资料用中位数(四分位数间距)[M(QR)]表示,组间比较采用秩和检验(Mann-Whitney *U* 检验)。计数资料比较采用 χ^2 检验。采用多因素 Logistic 回归分析 WML 的危险因素,采用多元有序 Logistic 回归分析与 WML 严重程度相关的 CVHI 参数。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 基线数据资料 本研究共纳入 183 例患者,无 WML 组 25 例,WML 组 158 例,平均年龄分别为(50.80±10.23)岁和(63.61±11.16)岁,男性占比分别为 60.00%和 70.90%。WML 组年龄、收缩压水平、脑血管病史均高于无 WML 组,差异均有统计学意义($P < 0.05$),WML 组男性占比、高血压、三酰甘油、吸烟史、饮酒史、低密度脂蛋白高于无 WML 组,差异无统计学意义($P > 0.05$),见表 1。

表 1 无 WML 组与 WML 组人口构成比较

Table 1 Comparison of population composition of patients without and with WML

组别	例数	男性(例数,%)	年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)	高血压 (例数,%)	糖尿病 (例数,%)	收缩压 ($\bar{x} \pm s$, mmHg)	舒张压 ($\bar{x} \pm s$, mmHg)	胆固醇 ($\bar{x} \pm s$, mmol/L)
无 WML 组	25	15(60.00)	50.80±10.23	17(68.00)	5(20.00)	138.38±17.58	88.95±12.64	4.35±1.63
WML 组	158	112(70.90)	63.61±11.16	118(74.70)	48(30.40)	150.95±19.84	89.98±13.30	4.01±1.29
$\chi^2/t/Z$ 值		0.695	5.145	0.207	0.956	2.742	0.331	1.194
<i>P</i> 值		0.404	<0.001	0.649	0.328	0.007	0.741	0.181
组别	例数	三酰甘油 [M(QR), mmol/L]	低密度脂蛋白 [M(QR), mmol/L]	同型半胱氨酸 [M(QR), mmol/L]	脑血管病史 (例数,%)	吸烟史 (例数,%)	饮酒史 (例数,%)	体重指数 ($\bar{x} \pm s$)
无 WML 组	25	1.73(1.29)	2.41(1.58)	12.40(4.25)	3(12.00)	6(24.00)	6(24.00)	25.55±3.72
WML 组	158	1.78(1.52)	2.19(1.04)	13.00(5.03)	52(32.90)	56(35.40)	34(21.50)	25.85±3.49
$\chi^2/t/Z$ 值		1.182	0.823	0.961	2.300	1.311	0.129	0.958
<i>P</i> 值		0.237	0.411	0.336	0.023	0.191	0.897	0.340

1 mmHg=0.133 kPa

2.2 无 WML 组与 WML 组 CVHI 各参数比较

相比于无 WML 组,WML 组的脑血流量较低

(Q_{mean} 、 V_{mean} 、 V_{max} 、 V_{min} ; $t = 3.897$ 、 5.907 、 5.118 、 5.476 ; P 均 < 0.001), 脑血管阻力升高 (R_v 、 DR ; $t = 4.941$ 、 3.898 ; P 均 < 0.001), 脑血管弹性下降 (W_v 、 Z_{cv} 、 DI ; $t = 3.762$ 、 3.750 、 4.149 ; P 均 < 0.001), 微循环灌注 (CP 、 DP ; $t = 2.340$ 、 1.905 ; $P = 0.020$ 、 0.058) 下降, 见表 2。以组间差异有统计学意

义的人口构成因素和 CVHI 参数为自变量、WML 发生为因变量带入多因素 Logistic 回归分析, 各个变量赋值见表 3; 结果显示, 年龄和收缩压水平与 WML 相关 ($OR = 1.081$, $95\% CI: 1.012 \sim 1.155$, $P = 0.021$; $OR = 1.040$, $95\% CI: 1.011 \sim 1.069$, $P = 0.007$), 见表 4。

表 2 无 WML 组与 WML 组 CVHI 比较

Table 2 Comparison of CVHI in patients without and with WML

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

组别	例数	$Q_{mean}(mL/s)$	$V_{mean}(cm/s)$	$V_{max}(cm/s)$	$V_{min}(cm/s)$	$W_v(m/s)$
无 WML 组	25	9.792 ± 1.728	19.555 ± 3.895	42.914 ± 5.760	9.100 ± 2.060	12.878 ± 3.222
WML 组	158	8.464 ± 1.567	14.794 ± 3.749	36.260 ± 6.133	6.150 ± 2.574	18.199 ± 6.991
t 值		3.897	5.907	5.118	5.476	3.762
P 值		< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

组别	例数	$Z_{cv}(kPa \cdot s/m)$	$DI(L/mmHg)$	$RV(kPa \cdot s/m)$	$DR(kPa \cdot s/m)$	$CP(kPa)$	$DP(kPa)$
无 WML 组	25	13.522 ± 3.384	0.883 ± 0.279	75.642 ± 17.006	33.349 ± 9.064	8.142 ± 1.581	2.954 ± 0.868
WML 组	158	19.096 ± 7.348	0.662 ± 0.245	110.236 ± 34.303	46.602 ± 16.596	8.989 ± 1.699	2.585 ± 0.917
t 值		3.750	4.149	4.941	3.898	2.340	1.905
P 值		< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.020	0.058

表 3 变量赋值表

Table 3 Variable assignment table

	变量名	类型	单位	取值范围
自变量	年龄	连续变量	岁	41~77
	收缩压	连续变量	mmHg	112~190
因变量	脑白质病变	无序分类变量	—	无=0, 有=1

表 4 WML 与人口构成因素和 CVHI 的多因素 Logistic 回归

Table 4 Multivariate Logistic regression analysis of WML with population composition and CVHI

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P 值	OR 值	95% CI
常数项	-8.612	7.640	1.271	0.260	—	—
年龄	0.078	0.034	5.341	0.021	1.081	1.012~1.155
收缩压	0.039	0.014	7.352	0.007	1.040	1.011~1.069

2.3 不同严重程度 WML 组 CVHI 比较 与轻度 WML 组相比, 中度 WML 组脑血流量降低 (V_{mean} 、 V_{min} ; $P = 0.043$ 、 0.032)、微循环灌注量下降 (R_v 、 CP ; $P = 0.033$ 、 0.019), 重度 WML 组同时有脑血流量降低、血管弹性降低和微循环灌注量减少

等特点 (V_{mean} 、 V_{min} 、 W_v 、 Z_{cv} 、 DP ; $P = 0.013$ 、 0.001 、 0.003 、 0.002 、 0.002); 与中度 WML 组比较, 重度 WML 组仅在血管弹性降低, 差异有统计学意义 (W_v 、 Z_{cv} ; $P = 0.023$ 、 $P = 0.022$), 见表 5、图 1。

表 5 不同严重程度 WML 患者 CVHI 比较

Table 5 Comparison of CVHI in patients with different severities of WML

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

组别	例数	$Q_{mean}(mL/s)$	$V_{mean}(cm/s)$	$V_{max}(cm/s)$	$V_{min}(cm/s)$	$W_v(m/s)$
轻度组	99	8.683 ± 1.474	15.425 ± 3.473	36.755 ± 6.300	6.569 ± 2.398	17.812 ± 7.431
中度组	36	8.146 ± 1.590	$13.969 \pm 4.179^*$	35.156 ± 6.224	$5.824 \pm 2.962^*$	$17.339 \pm 5.059^*$
重度组	23	8.115 ± 1.791	$13.275 \pm 3.905^*$	35.578 ± 5.669	$4.609 \pm 2.208^*$	$21.605 \pm 7.314^{* \#}$
F 值		2.249	4.168	1.024	5.990	3.186
P 值		0.109	0.017	0.362	0.003	0.044

组别	例数	$Z_{cv}(kPa \cdot s/m)$	$DI(L/mmHg)$	$RV(kPa \cdot s/m)$	$OR(kPa \cdot s/m)$	$CP(kPa)$	$DP(kPa)$
轻度组	99	18.702 ± 7.798	0.682 ± 0.263	102.960 ± 28.977	45.146 ± 16.574	8.700 ± 1.694	2.718 ± 0.899
中度组	36	18.206 ± 5.312	0.653 ± 0.207	$120.435 \pm 35.853^*$	47.065 ± 12.811	$9.462 \pm 1.934^*$	$2.487 \pm 1.022^*$
重度组	23	$22.685 \pm 7.679^{* \#}$	0.567 ± 0.199	$127.263 \pm 45.647^*$	53.674 ± 21.116	$9.326 \pm 1.127^*$	$2.112 \pm 0.667^*$
F 值		3.190	2.071	7.004	2.482	3.321	4.477
P 值		0.044	0.130	0.001	0.087	0.039	0.013

* P 值 < 0.05 与轻度组比较 # P 值 < 0.05 与中度组比较 (LSD- t 检验)

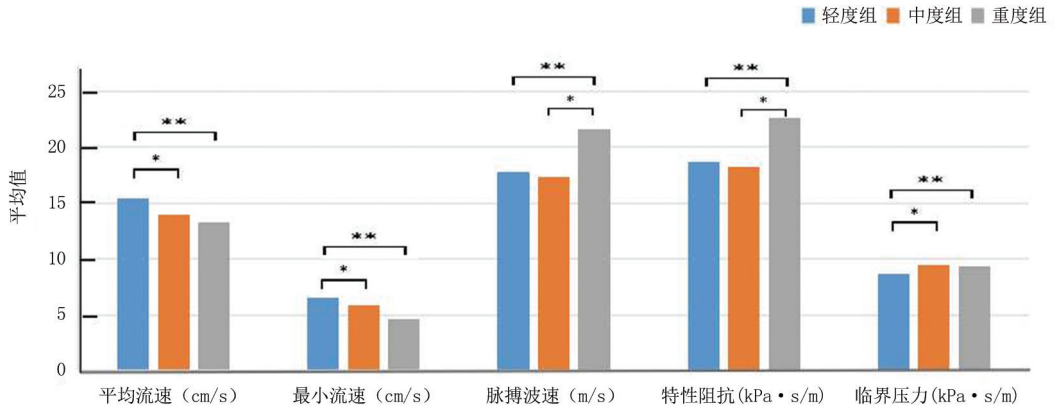


图 1 不同严重程度 WML 患者组间有差异的 CVHI 参数变化趋势

* P 值<0.05 ** P 值<0.01

Figure 1 Trends of differential CVHI parameters in patients with WML of different severities

以 CVHI 参数为自变量、WML 严重程度为因变量,进行多元有序 Logistic 回归,各变量赋值见表 6,结果显示,反应脑血流量的 Vmax、Vmin 与 WML 严重程度显著相关(OR = 1.176, 95% CI:

1.042~1.328, P = 0.009; OR = 2.629, 95% CI: 1.133~6.099, P = 0.024),其中 Vmin 与 WML 严重程度相关性最显著,见表 7。

表 6 变量赋值表

Table 6 Variable assignment table

变量名	类型	单位	取值范围
自变量 Vmax	连续变量	cm/s	22.070~50.840
Vmin	连续变量	cm/s	2.065~12.400
因变量 脑白质病变	有序分类变量	—	轻度=1,中度=2,重度=3

表 7 WML 严重程度与 CVHI 参数的多元有序 Logistic 回归

Table 7 Multivariate ordinal Logistic regression of WML severity and CVHI parameters

变量	回归系数	标准误	Wald χ^2 值	P 值	OR 值	95% CI
Vmax	0.162	0.062	2.624	0.009	1.176	1.042~1.328
Vmin	0.967	0.429	2.252	0.024	2.629	1.133~6.099

3 讨论

WML 作为脑小血管病的影像标志,其病理特征表现为小动脉纤维化、毛细血管稀疏及白质脱髓鞘,临床与认知障碍、卒中风险、帕金森病严重程度密切相关^[2-6]。目前 WML 的病理生理学机制尚不明确,可能涉及脑血流量减少、血管壁弹性下降、微循环障碍等多因素交互作用。WML 的脑血流动力学评估手段成为研究热点,如采用多普勒超声检查颈动脉和脑血管搏动性评估 WML 体积、测算大脑中动脉穿支动脉搏动性即 M1 段远端和近端的阻力指数(resistance index, RI)之比评估 WMH 的进展程度^[9-11];脉搏波速(pulse wave velocity, PWV)反映动脉硬化程度^[12-14];颅脑断层灌注扫描成像(CT perfusion, CTP)及动脉自旋标记灌注成像(arterial spin labeling, ASL)则通过脑灌注量(cerebral

perfusion volume, CBF)预测 WML 风险^[15-17]。然而,现有研究结论存在显著差异,可能与检查技术不一致、搏动指数(pulsation index, PI)个体波动、评估参数单一及机制复杂性等多因素相关^[18-19]。

本研究基于 CVHI,通过脑血流量(Qmean、Vmean、Vmax、Vmin)、脑血管弹性(Wv、Zcv)、脑循环通畅度(RV)、脑血管自身调节功能(DR)、微循环灌注(CP、DP)等多方面参数综合评估 WML 患者的脑血流动力学变化,分析研究结果发现,WML 患者的脑血流量降低、脑血管弹性减退、微循环血管阻力升高。且 WML 损伤程度不同,各个 CVHI 参数亦存在差异。与轻度 WML 相比,中度 WML 以脑血流量下降、微循环灌注量减低为主,重度 WML 进一步叠加血管弹性下降。基于上述研究结果,推测在 WML 的病理过程中,早期以脑血流量下降、微循环灌注量减低为始动并参与全程,随着 WML 的进

展,后期脑血管管壁弹性下降成为影响重度 WML 的主要因素。本研究通过对 WML 患者的 CVHI 进行分析,有助于了解 WML 发生过程中不同阶段血流动力学变化规律,进一步明确 WML 发生的病理生理机制,为临床诊疗提供参考依据。

本研究 CVHI 检查结果显示,WML 患者的脑血流量的指标(Qmean、Vmean、Vmax、Vmin)均下降,且 Vmin 与患者的 WML 严重程度显著相关。Vmin 的动力来源是心室舒张期的大动脉弹性回缩作用,故 Vmin 减慢是心室舒张末期压力低所致,脑血流量减低继而脑微循环灌注量下降,它可以作为评估脑微循环灌注最敏感的指标,这一研究结果与既往研究结论一致。van Dalen 等^[20]对老年高血压人群使用 3D Flair 测量 WML 体积、ASL 测量 CBF,结果显示 CBF 下降与更大的 WML 体积有关。Zhang 等^[15]采用 CTP 测量 CBF,发现 CBF 与 WML 严重程度呈负相关。van Es 等^[21]和 van der Veen 等^[22]的研究同样也证实了 CBF 下降与 WML 具有相关性。此外,有学者以影像学提示存在 WML 的人群为研究对象,进行大脑病理检查,结果发现小动脉和毛细血管浓度降低了 20%^[23],这也从侧面反映了 WML 患者的脑灌注量下降。然而,部分基于社区和有认知功能减退人群的研究显示,结果未证实 WML 由 CBF 改变导致^[10,24-25],这可能与测量整体而非局部 CBF 有关,有研究^[26-27]显示 WML 引起毛细血管紊乱、局部脑血流不均匀、局部脑组织氧提取率异常,而对整体脑灌注量影响甚微。

本研究中通过 CVHI 评估发现,WML 患者反映脑血管弹性状态和阻力状况的指标较高,提示 WML 患者脑小血管阻力升高、自动调节能力下降,这与既往部分研究结果一致。既往研究^[28-31]中,血管硬化的评估指标包括主动脉 PWV、PI 值、压力波分析等。PWV 在硬化的血管中传播速度更快,已经被推荐用于评估心血管病患者的靶器官损伤^[32-35]。Caughey 等^[36]通过对 1 275 例无卒中的社区人群测量颈一股动脉 PWV 和颅脑 MRI 的研究,发现颈一股动脉 PWV 升高与更大的 WML 体积有关;Bown 等^[37]研究显示基线主动脉 PWV 升高能预测 WML 病变体积增加;Zhai 等^[38]的研究也得出相似结论。此外,部分研究^[10,39]采用 TCD 检测大脑中动脉 PI 值或 RI 值,与 WML 作相关性分析,本研究也与其一致,发现基线较高的 PI 值与较

严重的 WML 相关^[40],并且卒中病灶同侧 PI 与 WML 的相关性最强^[41],具有脑血管病危险因素患者的 PI 值与脑小血管疾病负担相关^[39,42],RI 值与 WML 进展相关^[43]。经颅多普勒超声评估的颈总动脉或大脑中动脉 PI 值或 RI 值能够提示动脉硬化和动脉阻力的增加,是 WML 的机制之一。

CVHI 检测指标中 CP 和 DP 能反映微循环状态,CP 升高或者 DP 降低提示微循环障碍。本研究发现 WML 患者的 CP 和 DP 与 WML 严重程度有一定相关性,提示 WML 患者存在微循环障碍。本研究未观察到毛细血管临界关闭压与 WML 严重程度显著相关,考虑与以下原因相关:①CVHI 检测受到操作者手法和习惯影响,比如压力探头放置部位、手部力度、选择压力波形等均可对结果造成不同程度的影响;②CVHI 主要通过检测颈动脉搏动完成压力分析,距离 WML 位置较远。既往有研究报道大动脉的 PI 值与 WML 严重程度相关性强弱顺序依次是大脑中动脉、颈内动脉、颈总动脉,其解剖结构支持测量指标与 WML 的距离有关,故本研究推测未见统计学差异也是源于此。这种距离关系在脑小血管病的血脑屏障破坏机制中也亦存在,有研究结果发现脑小血管病与神经血管单元的受损有关,在靠近 WML 的区域血脑屏障损伤更严重、CBF 更低,且 CBF 和血脑屏障损伤二者之间的关联性越强^[44]。

综上所述,CVHI 检测方法简便、禁忌证少、价格相对较低,适合作为门诊筛查 WML 患者的常规检查,亦可补充 MRI 的不足。本研究尚存在一定的局限性,CVHI 受多种因素影响,且为单中心回顾性研究,样本量偏小,数据分析可能存在一定的偏倚,有待于开展更全面的研究来进一步分析 WML 与 CVHI 的相关性。

[参考文献]

- [1] 中国研究型医院学会脑小血管病专业委员会《中国脑小血管病诊治专家共识》编写组.中国脑小血管病诊治专家共识 2021[J].中国卒中杂志,2021,16(7):716-726.
- [2] Membreno R,Thomas KR,Calcetas AT,et al. Regional white matter hyperintensities relate to specific cognitive abilities in older adults without dementia [J]. Alzheimer Dis Assoc Disord,2023,37(4):303-309.
- [3] Sharma R,Sekhon S,Lui F,et al. White matter lesions[J]. White Matter Lesions,2024.
- [4] Sinani O,Dadouli K,Ntellas P,et al. Association between white matter lesions and Parkinson's disease: An impact on

- Postural/Gait difficulty phenotype and cognitive performance [J]. *Neurol Res*, 2022, 44(12): 1122-1131.
- [5] Zhu Y, Du R, He Z, et al. Assessing the association between white matter lesions and Parkinson's disease[J]. *Neurol Sci*, 2023, 44(3): 897-903.
- [6] 赵爱, 宋道, 李星君, 等. 脑白质病变对帕金森病相关症状的影响[J]. *中风与神经疾病杂志*, 2025, 42(2): 137-142.
- [7] 李喜梅, 王瑜, 叶燕珍, 等. 脑血管功能检测在早期筛查脑血管疾病中的应用价值[J]. *中国医疗设备*, 2015, 30(9): 40-43.
- [8] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国脑小血管病诊治指南 2020[J]. *中华神经科杂志*, 2022, 55(8): 807-818.
- [9] Lefferts WK, Lefferts EC, Hibner BA, et al. Impact of acute changes in blood pressure and arterial stiffness on cerebral pulsatile haemodynamics in young and middle-aged adults[J]. *Exp Physiol*, 2021, 106(7): 1643-1653.
- [10] Reeve EH, Barnes JN, Moir ME, et al. Impact of arterial stiffness on cerebrovascular function: A review of evidence from humans and preclinical models[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2024, 326(3): h689-h704.
- [11] Vikner T, Karalija N, Eklund A, et al. 5-Year associations among cerebral arterial pulsatility, perivascular space dilation, and white matter lesions[J]. *Ann Neurol*, 2022, 92(5): 871-881.
- [12] Scheuermann BC, Parr SK, Schulze KM, et al. Associations of cerebrovascular regulation and arterial stiffness with cerebral small vessel disease: A systematic review and meta-analysis [J]. *J Am Heart Assoc*, 2023, 12(23): e032616.
- [13] 吴静静, 黎菲, 王婕, 等. 脉搏波传导速度评价血管老化的临床研究进展[J]. *中南大学学报(医学版)*, 2024, 49(12): 1991-1998.
- [14] Cavero-Redondo I, Sequi-Domínguez I, Saz-Lara A, et al. Concordance among pulse wave velocity assessment methods: A network meta-analysis[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2024, 137(17): 2137-2139.
- [15] Zhang D, Zhang J, Zhang B, et al. Association of blood pressure, white matter lesions, and regional cerebral blood flow[J]. *Med Sci Monit*, 2021, 27: e929958.
- [16] Binnie LR, Pauls MMH, Benjamin P, et al. Test-retest reliability of arterial spin labelling for cerebral blood flow in older adults with small vessel disease[J]. *Transl Stroke Res*, 2022, 13(4): 583-594.
- [17] Thammasart S, Harvey DJ, Maillard P, et al. Associations between cerebral blood flow and progression of white matter hyperintensities[J]. *Front Neuroimaging*, 2025, 3: 1463311.
- [18] Han H, Ning Z, Yang D, et al. Associations between cerebral blood flow and progression of white matter hyperintensity in community-dwelling adults: A longitudinal cohort study[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2022, 12(8): 4151-4165.
- [19] Mena Romo L, Gómez-Choco M. Neuroimaging in small vessel disease[J]. *Hipertens Riesgo Vasc*, 2023, 40(1): 25-33.
- [20] van Dalen JW, Mutsaerts HJMM, Nederveen AJ, et al. White matter hyperintensity volume and cerebral perfusion in older individuals with hypertension using arterial spin-labeling[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2016, 37(10): 1824-1830.
- [21] van Es AC, van der Grond J, ten Dam VH, et al. Associations between total cerebral blood flow and age related changes of the brain[J]. *PLoS One*, 2010, 5(3): e9825.
- [22] van der Veen PH, Muller M, Vincken KL, et al. Longitudinal relationship between cerebral small-vessel disease and cerebral blood flow: The second manifestations of arterial disease-magnetic resonance study[J]. *Stroke*, 2015, 46(5): 1233-1238.
- [23] Moody DM, Thore CR, Anstrom JA, et al. Quantification of afferent vessels shows reduced brain vascular density in subjects with leukoaraiosis[J]. *Radiology*, 2004, 233(3): 883-890.
- [24] Onkenhout L, Appelmans N, Kappelle LJ, et al. Cerebral perfusion and the burden of small vessel disease in patients referred to a memory clinic[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2020, 49(5): 481-486.
- [25] Shi Y, Thrippleton MJ, Blair GW, et al. Small vessel disease is associated with altered cerebrovascular pulsatility but not resting cerebral blood flow[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2020, 40(1): 85-99.
- [26] Wong SM, Jansen JFA, Zhang CE, et al. Bloodbrain barrier impairment and hypoperfusion are linked in cerebral small vessel disease[J]. *Neurology*, 2019, 92(15): e1669-e1677.
- [27] Østergaard L, Granfeldt A, Secher N, et al. Microcirculatory dysfunction and tissue oxygenation in critical illness[J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2015, 59(10): 1246-1259.
- [28] Aimagambetova B, Ariko T, Merritt S, et al. Arterial stiffness measured by pulse wave velocity correlated with cognitive decline in hypertensive individuals: A systematic review[J]. *BMC Neurol*, 2024, 24(1): 393.
- [29] 孔蓉, 孙瑾, 陈竹闻. 经颅多普勒及颈动脉超声在脑动脉硬化患者中的诊断效果及其与认知功能的相关性研究[J]. *中国医学装备*, 2022, 19(6): 83-87.
- [30] 程雨欣, 王臻, 梁潇, 等. 超声多普勒技术和压力波法测量肱-踝脉搏波传播速度一致性研究[J]. *中国超声医学杂志*, 2024, 40(8): 893-897.
- [31] Álvarez-Bueno C, Medrano M, Lucerón-Lucas-Torres M, et al. Association between pulse wave velocity and white matter hyperintensities among older adults: A meta-analysis of cross-sectional and longitudinal studies[J]. *Ageing Res Rev*, 2024, 101: 102501.
- [32] Photiou G, Kouis P, Papisavva Z, et al. Association between socioeconomic indicators and pulse wave velocity (PWV) measurements in population studies: A systematic review and meta-analysis[J]. *BMC Public Health*, 2025, 25(1): 1937.
- [33] Suárez-Cuenca JA, Montoya-Ramírez J, Gutiérrez-Buendía JA, et al. Pulse-wave velocity, flow-mediated dilation, and

- carotid intima-media thickness to assess cardiovascular risk in population with metabolic syndrome[J]. *J Vis Exp*, 2024, (211).
- [34] Niwińska MM, Chlabicz S. Evaluation of arterial stiffness parameters measurement with noninvasive methods-A systematic review [J]. *Cardiol Res Pract*, 2024, 2024: 4944517.
- [35] Kodithuwakku V, Breslin M, Hersant J, et al. Establishing reference values for pulse wave velocity in young people: The youth vascular consortium[J]. *Hypertension*, 2025, 82(7): 1234-1245.
- [36] Caughey MC, Qiao Y, Meyer ML, et al. Relationship between central artery stiffness, brain arterial dilation, and white matter hyperintensities in older adults: The aric study-brief report[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2021, 41(6): 2109-2116.
- [37] Bown CW, Khan OA, Moore EE, et al. Elevated aortic pulse wave velocity relates to longitudinal gray and white matter changes[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2021, 41(12): 3015-3024.
- [38] Zhai FF, Ye YC, Chen SY, et al. Arterial stiffness and cerebral small vessel disease[J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 723.
- [39] Wohlfahrt P, Krajcoviechova A, Jozifova M, et al. Large artery stiffness and carotid flow pulsatility in stroke survivors [J]. *J Hypertens*, 2014, 32(5): 1097-1103.
- [40] 苏芳慧, 杨清成, 郭艳平. 头颈血管超声预测脑小血管病重度脑白质病变的价值[J]. *中国超声医学杂志*, 2025, 41(7): 724-728.
- [41] Nam KW, Kwon HM, Lee YS. Distinct association between cerebral arterial pulsatility and subtypes of cerebral small vessel disease[J]. *PLoS One*, 2020, 15(7): e0236049.
- [42] 黎莹, 田庆华, 姜亦欣, 等. 脑小血管病与血管储备及认知障碍相关性研究进展[J]. *中风与神经疾病杂志*, 2024, 41(10): 945-949.
- [43] Song X, Chen W, Zhao X, et al. Decreased flow in ischemic stroke with coexisting intracranial artery stenosis and white matter hyperintensities[J]. *J Cent Nerv Syst Dis*, 2024, 16: 11795735241266572.
- [44] Wong SM, Jansen JFA, Zhang CE, et al. Blood-brain barrier impairment and hypoperfusion are linked in cerebral small vessel disease[J]. *Neurology*, 2019, 92(15): e1669-e1677.

(本文编辑:何祯)