

经颅多普勒超声对脑血流自动调节的性别差异性研究

陈虹秀 崔柳平 陈松伟 刘然 李娜 邢英琦

【摘要】 目的 探讨不同体位下动态脑血流自动调节(dCA)的性别差异。**方法** 纳入2021年8月至2022年11月在北京首都医科大学宣武医院行体格检查的130名健康成人(男性65名和女性65名),应用无创连续血压测量仪和经颅多普勒超声检测无创逐波血压和大脑中动脉血流速度,传递函数分析法对比分析不同体位和性别在超低频(0.02~0.07 Hz)、低频(0.07~0.20 Hz)和高频(0.20~0.50 Hz)频域内的dCA参数(包括增益绝对值和百分比、相位差、一致性)。**结果** 超低频和低频频域内直立位相位差均低于仰卧位[(57.37±12.45)°对(66.72±16.64)°, $t = -6.428, P = 0.000$; (36.82±11.59)°对(43.02±11.51)°, $t = -6.052, P = 0.000$],一致性则高于仰卧位(0.73±0.06对0.66±0.06, $t = -8.947, P = 0.000$; 0.76±0.06对0.73±0.07, $t = -2.693, P = 0.007$)。无论仰卧位还是直立位,男性在低频[(0.91±0.23) cm/(s·mm Hg)对(1.04±0.23) cm/(s·mm Hg), $t = 3.075, P = 0.003$; (0.84±0.19) cm/(s·mm Hg)对(0.95±0.21) cm/(s·mm Hg), $t = 3.102, P = 0.002$]和高频[(0.94±0.25) cm/(s·mm Hg)对(1.11±0.27) cm/(s·mm Hg), $t = 3.740, P = 0.000$; (0.91±0.21) cm/(s·mm Hg)对(1.05±0.23) cm/(s·mm Hg), $t = 3.747, P = 0.000$]频域内大脑中动脉增益绝对值均低于女性,低频频域内相位差高于女性[(45.25±10.21)°对(40.81±12.37)°, $t = -2.239, P = 0.027$; (38.90±12.25)°对(34.74±10.57)°, $t = -2.072, P = 0.040$]。**结论** 体位变化可影响脑血流自动调节能力,仰卧位dCA得以改善;低频和高频频域内男性与女性dCA存在一定差异。

【关键词】 超声检查,多普勒,经颅; 大脑中动脉; 血压; 血流动力学; 体位; 性别特征

Study on sex difference of cerebral autoregulation by transcranial Doppler ultrasonography

CHEN Hong-xiu, CUI Liu-ping, CHEN Song-wei, LIU Ran, LI Na, XING Ying-qi
Department of Vascular Ultrasonography, Xuanwu Hospital, Capital Medical University,
Beijing 100053, China

Corresponding author: XING Ying-qi (Email: xingyq2009@sina.com)

【Abstract】 Objective To investigate sex difference of dynamic cerebral autoregulation (dCA) in different body positions. **Methods** A total of 130 healthy adults (65 males and 65 females) who underwent physical examination in Xuanwu Hospital Capital Medical University from August 2021 to November 2022 were included. Non-invasive continuous blood pressure monitor and transcranial Doppler ultrasonography (TCD) were used to monitor beat-to-beat blood pressure and middle cerebral artery (MCA) cerebral blood flow velocity (CBFV), respectively. Transfer function analysis (TFA) was used to compare and analyze the dCA parameters (absolute gain value and percentage gain, phase, coherence) in the range of very low frequency (0.02–0.07 Hz), low frequency (0.07–0.20 Hz) and high frequency (0.20–0.50 Hz) of different positions and sex. **Results** The phase in very low frequency and low frequency were significantly lower in the standing position than in the supine position [(57.37±12.45)° vs. (66.72±16.64)°, $t = -6.428, P = 0.000$; (36.82±11.59)° vs. (43.02±11.51)°, $t = -6.052, P = 0.000$], while the coherence in very low frequency and low frequency were significantly higher in the standing position than in the supine position (0.73±0.06 vs. 0.66±0.06, $t = -8.947, P = 0.000$; 0.76±0.06 vs. 0.73±0.07, $t = -2.693, P = 0.007$). In both supine and standing positions, absolute gain value of male in the low frequency [(0.91±0.23) cm/(s·mm Hg)

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2023.08.016

基金项目:首都医科大学宣武医院2022年度国自然青年培育项目(项目编号:QNPY2022007)

作者单位:100053 北京,首都医科大学宣武医院血管超声诊断科

通讯作者:邢英琦,Email:xingyq2009@sina.com

vs. (1.04 ± 0.23) cm/(s·mm Hg), $t = 3.075$, $P = 0.003$; (0.84 ± 0.19) cm/(s·mm Hg) vs. (0.95 ± 0.21) cm/(s·mm Hg), $t = 3.102$, $P = 0.002$] and high frequency [(0.94 ± 0.25) cm/(s·mm Hg) vs. (1.11 ± 0.27) cm/(s·mm Hg), $t = 3.740$, $P = 0.000$; (0.91 ± 0.21) cm/(s·mm Hg) vs. (1.05 ± 0.23) cm/(s·mm Hg), $t = 3.747$, $P = 0.000$] was lower than those of female, while the phase in the low frequency was higher than that of female [$(45.25 \pm 10.21)^\circ$ vs. $(40.81 \pm 12.37)^\circ$, $t = -2.239$, $P = 0.027$; $(38.90 \pm 12.25)^\circ$ vs. $(34.74 \pm 10.57)^\circ$, $t = -2.072$, $P = 0.040$].

Conclusions Postural changes can also affect the cerebral autoregulation, and dCA can be improved in the supine position; there is no significant difference in dCA between male and female in the very low frequency, but there is a certain difference between the sex in the low frequency and high frequency.

【Key words】 Ultrasonography, Doppler, transcranial; Middle cerebral artery; Blood pressure; Hemodynamics; Posture; Gender identity

This study was supported by Xuanwu Hospital Capital Medical University Science Program for Fostering Young Scholars in 2022 (No. QNPY2022007).

Conflicts of interest: none declared

脑血流自动调节(CA)的概念于1959年由Lassen等首次提出,系指平均动脉压波动于60~150 mm Hg(1 mm Hg = 0.133 kPa)时通过调节颅内小血管管径使脑血管阻力发生相应变化以维持脑血流量(CBF)相对恒定的能力,是预防脑过度灌注或脑低灌注的重要方式^[1-2]。脑血流自动调节分为静态脑血流自动调节(sCA)和动态脑血流自动调节(dCA)两种类型,前者指血压或脑灌注压(CPP)缓慢变化前后的脑血流量变化,反映整体调节能力及其自动调节的上限和下限,但因常需去氧肾上腺素等药物干预实现血压变化且检测方法具有一定侵入性,无法及时反映短时间内血压变化对脑血流自动调节能力的影响^[1]。目前关注点主要集中于dCA,指血压或脑灌注压变化瞬间的脑血流量即时反应。1982年经颅多普勒超声(TCD)的问世实现脑血流速度(CBFV)的可持续性测量,给脑血流自动调节领域带来革新,可以进行脑血流动力学的逐波分析^[2],历经30余年发展,脑血流自动调节检测技术和分析方法日趋多样^[3],目前TCD已成为临床应用最广泛的方法^[4]。既往在不同人群中进行的dCA研究通常基于仰卧位自发性血压波动^[5],而直立位dCA易忽视,尚不清楚体位变化是否对其产生影响,Favre等^[5]强调不同体位下评估dCA的重要性。此外,女性发生站立不耐受和晕厥前兆的概率明显高于男性,提示脑血管系统对血压快速变化的反应能力存在性别差异(即与dCA相关)^[6]。近年来,脑血流速度和脑血管反应性(CVR)的性别差异被广泛研究^[5,7-8],有少数研究采用传递函数分析法探究仰卧位dCA的性别差异,但各项研究结果不尽一致^[5-6,9]。基于此,本研究采用TCD检测健康人群dCA参数,

探讨不同性别之间dCA参数差异,并对比分析自发dCA(仰卧位静息态血压和脑血流量的自发波动)和诱发dCA(主动站立刺激血压急剧变化)参数差异,以期为临床判断dCA损害提供参考依据。

资料与方法

一、临床资料

选择2021年8月至2022年11月在首都医科大学宣武医院进行体格检查的130名健康成年人作为研究对象,排除TCD显示双侧颞窗不透声,TCD和颈部血管超声诊断为血管狭窄,既往有影响dCA参数的神经系统疾病如脑卒中、脑小血管病、阿尔茨海默病、卵圆孔未闭、糖尿病、颅脑创伤等。其中,男性65名,女性65名;年龄18~70岁,平均 (45.55 ± 13.55) 岁,男性 (45.34 ± 14.85) 岁、女性 (45.77 ± 12.22) 岁,不同性别受试者年龄差异无统计学意义($t = 0.181$, $P = 0.857$)。本研究经首都医科大学宣武医院伦理委员会审核批准(审批号:临研审[2021]109号),所有受试者均对本研究检查方法知情并签署知情同意书。

二、研究方法

1. 动态脑血流自动调节检测 (1)检测前准备:根据《国际脑血流自动调节研究网络的白皮书》(CARNet)^[10]推荐,尽量在温度受控环境(理想温度22~24℃)中进行,检测前12h内避免摄入酒精和含咖啡因的饮料、6h内避免运动、4h内避免进食高热量食物。(2)检测方法:根据《CARNet白皮书2022更新》^[10]推荐的传递函数分析(TFA)标准化流程,由经验丰富的血管超声科医师采用多功能TCD检测仪(EMS-9D PRO,深圳市德力凯医疗设备股份有限

公司)进行 dCA 评估。受试者呈仰卧位,安静休息 15 min,不能交叉双腿;佩戴 TCD 监护头架,于双侧颞窗 50~65 mm 深度处测量大脑中动脉(MCA)脑血流速度,同时佩戴合适尺寸的手指动脉容积夹(Finometer[®],荷兰 FMS 公司)同步记录无创逐波血压(NIBP),并以检测前欧姆龙电子血压计测量的肱动脉基线血压进行校正;连接鼻导管以监测呼气末二氧化碳分压(PetCO₂),同步监测心率;全程实时记录仰卧位(10 min)和直立位(10 min)大脑中动脉 CBFV、NIBP、PetCO₂以及心率,并通过配备的实时脑血流自动调节分析软件(CA-200 型,深圳市德力凯医疗设备股份有限公司)以完成 dCA 参数的数据分析。

2. 数据分析 据《CARNet 白皮书 2022 更新》^[10]推荐的 TFA 标准化流程,于超低频(0.02~0.07 Hz)、低频(0.07~0.20 Hz)、高频(0.20~0.50 Hz)3 个频域范围内分析输入信号(血压)和输出信号(CBFV)的即时变化,计算 dCA 参数,包括增益(绝对值和百分比)、相位差、一致性^[10]。其中,相位差是公认的最可靠的评价 dCA 指标,表示 CBFV 随血压变化所产生波动的时间差,相位差越大、dCA 越稳定;增益表示 CBFV 随血压变化的波幅,增益越小、dCA 越稳定;一致性表示 CBFV 与血压之间的线性关系,一致性越接近 1、二者线性相关性越强。由于双侧大脑半球 dCA 参数无明显差异,取双侧平均值用于进一步分析,主要关注超低频和低频 dCA 参数。

3. 统计分析方法 采用 SPSS 27.0 统计软件进行数据处理与分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验行正态性检验,呈正态分布的计量资料以均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,采用两独立样本的 *t* 检验或配对 *t* 检验;呈非正态分布的计量资料以中位数和四分位数间距 [$M(P_{25}, P_{75})$] 表示,采用 Mann-Whitney *U* 检验或 Wilcoxon 符号秩和检验。以 $P \leq 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

本组 130 名受试者仰卧位大脑中动脉 CBFV 41.83~87.83 cm/s,平均(61.13 ± 10.46) cm/s;无创逐波血压所测量的收缩压 96~145 mm Hg,平均(120.23 ± 11.44) mm Hg;舒张压 52~97 mm Hg,平均(74.51 ± 9.52) mm Hg;直立位大脑中动脉 CBFV 36.00~83.67 cm/s,平均(58.00 ± 9.95) cm/s;无创逐波血压所测量的收缩压 94~144 mm Hg,平均

表 1 不同性别受试者一般资料的比较($\bar{x} \pm s$)

Table 1. Comparison of basic information between male and female ($\bar{x} \pm s$)

观察指标	男性 (n=65)	女性 (n=65)	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
仰卧位				
CBFV(cm/s)	59.13 ± 10.51	63.16 ± 10.10	2.172	0.032
收缩压(mm Hg)	124.23 ± 9.84	116.23 ± 11.61	-4.243	0.000
舒张压(mm Hg)	76.71 ± 8.53	72.31 ± 10.00	-2.697	0.008
直立位				
CBFV(cm/s)	56.17 ± 9.88	59.91 ± 9.73	2.118	0.036
收缩压(mm Hg)	122.45 ± 10.36	115.74 ± 11.03	-3.503	0.000
舒张压(mm Hg)	75.95 ± 8.72	72.42 ± 10.55	-2.075	0.040
PetCO ₂ (mm Hg)	39.42 ± 2.44	39.04 ± 2.71	-0.787	0.433
心率(次/min)	71.50 ± 9.53	71.12 ± 9.48	-0.233	0.816

CBFV, cerebral blood flow velocity, 脑血流速度; PetCO₂, partial pressure end-tidal carbon dioxide, 呼气末二氧化碳分压

(119.07 ± 11.17) mm Hg;舒张压 51~94 mm Hg,平均(74.13 ± 9.79) mm Hg;PetCO₂ 33~44 mm Hg,平均(39.21 ± 2.57) mm Hg;心率 55~96 次/min,平均(71.31 ± 9.47) 次/min。男性仰卧位和直立位大脑中动脉 CBFV 低于女性($P = 0.032, 0.036$),收缩压($P = 0.000, 0.000$)和舒张压($P = 0.008, 0.040$)高于女性,而不同性别之间 PetCO₂ ($P = 0.433$)和心率($P = 0.816$)差异无统计学意义(表 1)。

不同体位下 dCA 参数比较,尽管超低频、低频和高频频域内直立位大脑中动脉增益绝对值均低于仰卧位($P = 0.002, 0.000, 0.000$),但是增益百分比不同体位之间差异无统计学意义(均 $P > 0.05$,表 2)。相位差作为最可靠的 dCA 评价指标,超低频和低频频域内直立位大脑中动脉相位差均低于仰卧位($P = 0.000, 0.000$),一致性均高于仰卧位($P = 0.000, 0.007$),表明在该频域内直立位血压与大脑中动脉 CBFV 的线性关系更强;高频频域内不同体位下相位差和一致性差异无统计学意义(均 $P > 0.05$,表 2)。

仰卧位下不同性别 dCA 参数比较,超低频频域内,不同性别之间各项 dCA 参数差异无统计学意义(均 $P > 0.05$);低频频域内,男性大脑中动脉增益绝对值低于女性($P = 0.003$)、相位差高于女性($P = 0.027$),但是不同性别增益百分比和一致性差异无统计学意义(均 $P > 0.05$);高频频域内,仅男性增益绝对值低于女性($P = 0.000$),但是不同性别增益百分比、相位差和一致性差异无统计学意义(均 $P >$

表 2 不同体位下 dCA 参数的比较 (n = 130, $\bar{x} \pm s$)

Table 2. Comparison of dCA parameters between supine and standing positions (n = 130, $\bar{x} \pm s$)

组别	增益绝对值[cm/(s·mm Hg)]	增益百分比(%/mm Hg)	相位差(°)	一致性
超低频(0.02~0.07 Hz)*				
仰卧位	0.76 (0.60, 0.90)	1.08 (0.93, 1.37)	66.72 ± 16.64	0.66 ± 0.06
直立位	0.72 (0.60, 0.87)	1.10 (0.99, 1.37)	57.37 ± 12.45	0.73 ± 0.06
Z 或 t 值	-3.169	-0.102	-6.428	-8.947
P 值	0.002	0.919	0.000	0.000
低频(0.07~0.20 Hz)				
仰卧位	0.98 ± 0.24	1.47 ± 0.31	43.02 ± 11.51	0.73 ± 0.07
直立位	0.90 ± 0.21	1.43 ± 0.32	36.82 ± 11.59	0.76 ± 0.06
t 值	-5.919	1.768	-6.052	-2.693
P 值	0.000	0.079	0.000	0.007
高频(0.20~0.50 Hz)				
仰卧位	1.03 ± 0.28	1.56 ± 0.37	13.02 ± 9.27	0.75 ± 0.06
直立位	0.98 ± 0.23	1.55 ± 0.31	12.54 ± 9.12	0.76 ± 0.06
t 值	-4.258	-0.861	-0.391	-0.015
P 值	0.000	0.389	0.696	0.988

*The absolute gain value and percentage gain of very low frequency in supine and standing positions were expressed as $M(P_{25}, P_{75})$, 超低频仰卧位和直立位增益绝对值和增益百分比表示为 $M(P_{25}, P_{75})$ 。Wilcoxon signed rank sum test for comparison of very low frequency absolute gain value and percentage gain, and paired t test for comparison of others, 超低频增益绝对值和增益百分比的比较行 Wilcoxon 符号秩和检验, 其余指标的比较行配对 t 检验

0.05, 表 3)。

直立位下不同性别 dCA 参数比较, 超低频范围内, 不同性别之间各项 dCA 参数差异无统计学意义 (均 $P > 0.05$); 低频频域内, 男性大脑中动脉增益绝对值低于女性 ($P = 0.002$)、相位差高于女性 ($P = 0.040$), 但是不同性别增益百分比和一致性差异无统计学意义 (均 $P > 0.05$); 高频频域内, 仅男性增益绝对值低于女性 ($P = 0.000$), 但是不同性别增益百分比、相位差和一致性差异无统计学意义 (均 $P > 0.05$, 表 4)。

讨 论

TCD 具有安全、无创、可床旁操作、时间分辨率极高等优势, 成为具有里程碑意义的脑血流动力学评估方法^[11], 其评估 dCA 主要通过测量大脑中动脉 CBFV, 即在假设管径不变的前提下将 CBFV 作为脑血流量的直接标志物^[12]。一项系统综述纳入 49 项针对 sCA 的临床研究, 其中 41 项基于 TCD 测量脑血流量, 与其他方法 (如 MRI、PET) 测量的脑血流量之间无明显差异, 表明 TCD 是评估脑血流自动调节能

力的有效方法^[13]。已知 dCA 损害与多种神经系统疾病密切相关, 如脑卒中、阿尔茨海默病、脑静脉血栓形成和颅脑创伤等^[14-18]。鉴于 dCA 的复杂性, 目前已研发出多种无创性分析方法, 如频域分析、时域分析、非稳定分析等^[19-21], 其中 TFA 法利用快速傅里叶变换 (FFT) 将平稳的输入信号 (血压) 和输出信号 (脑血流量) 分解为不同频率正弦和余弦的叠加, 进一步量化 dCA。《CARNet 白皮书 2022 更新》^[10] 更新了规范化研究 dCA 的 TFA 参数及其设置, 本研究据其推荐总结健康人群在仰卧位和直立位两种体位下的 dCA 正常参考值, 并对分析不同性别之间 dCA 参数在超低频、低频、高频 3 个频域内的差异, 结果显示, 无论是仰卧位还是直立位, 男性在低频和高频频域内大脑中动脉增益绝对值均低于女性, 低频频域内相位差高于女性, 表明男性 dCA 优于女性。Wang 等^[9] 同样采用 TFA 法分析仰卧位 dCA, 发现女性在 0.03~0.10 和 0.22~0.31 Hz 频域内增益明显高于男性, 表明男性 dCA 优于女性; 国外一项针对健康青少年的 dCA 研究也证实, 男性前循环血流自动调节指数 (ARI) 高于女生^[22], 与本研究结果相

表 3 仰卧位下不同性别受试者 dCA 参数的比较($\bar{x} \pm s$)

Table 3. Comparison of dCA parameters between male and female in the supine position ($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	增益绝对值[cm/(s·mm Hg)]	增益百分比(%/mm Hg)	相位差(°)	一致性
超低频(0.02~0.07 Hz)*					
男性	65	0.71(0.58,0.90)	1.08(0.96,1.35)	68.08 ± 16.86	0.67 ± 0.06
女性	65	0.79(0.62,0.90)	1.08(0.88,1.40)	65.35 ± 16.43	0.66 ± 0.05
Z 或 t 值		-1.071	-0.775	-0.936	-0.316
P 值		0.284	0.438	0.351	0.752
低频(0.07~0.20 Hz)*					
男性	65	0.91 ± 0.23	1.40(1.23,1.71)	45.25 ± 10.21	0.74 ± 0.07
女性	65	1.04 ± 0.23	1.46(1.29,1.68)	40.81 ± 12.37	0.73 ± 0.08
t 或 Z 值		3.075	-0.447	-2.239	-0.095
P 值		0.003	0.633	0.027	0.925
高频(0.20~0.50 Hz)					
男性	65	0.94 ± 0.25	1.52 ± 0.38	11.74 ± 8.42	0.75 ± 0.05
女性	65	1.11 ± 0.27	1.60 ± 0.35	14.29 ± 9.94	0.76 ± 0.05
t 值		3.740	1.270	1.572	0.831
P 值		0.000	0.206	0.119	0.408

*The absolute gain value and percentage gain of very low frequency, and percentage gain of low frequency in male and female were expressed as $M(P_{25}, P_{75})$, 男性和女性超低频增益绝对值和百分比以及低频增益百分比表示为 $M(P_{25}, P_{75})$ 。Mann-Whitney U test for comparison of very low frequency absolute gain value and percentage gain, and low frequency percentage gain, and two-independent-sample t test for comparison of others, 超低频增益绝对值和增益百分比以及低频增益百分比的比较行 Mann-Whitney U 检验, 其余指标的比较行两独立样本的 t 检验

表 4 直立位下不同性别受试者 dCA 参数的比较($\bar{x} \pm s$)

Table 4. Comparison of dCA parameters between male and female in the standing position ($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	增益绝对值[cm/(s·mm Hg)]	增益百分比(%/mm Hg)	相位差(°)	一致性
超低频(0.02~0.07 Hz)*					
男性	65	0.71 ± 0.20	1.11(1.02,1.37)	59.19 ± 13.53	0.74 ± 0.06
女性	65	0.76 ± 0.21	1.08(0.91,1.38)	55.55 ± 11.07	0.72 ± 0.06
t 或 Z 值		1.506	-1.321	-1.680	-1.947
P 值		0.135	0.186	0.095	0.054
低频(0.07~0.20 Hz)					
男性	65	0.84 ± 0.19	1.47 ± 0.32	38.90 ± 12.25	0.76 ± 0.06
女性	65	0.95 ± 0.21	1.40 ± 0.30	34.74 ± 10.57	0.76 ± 0.06
t 值		3.102	-1.159	-2.072	-0.339
P 值		0.002	0.248	0.040	0.735
高频(0.20~0.50 Hz)					
男性	65	0.91 ± 0.21	1.56 ± 0.33	13.83 ± 7.95	0.76 ± 0.06
女性	65	1.05 ± 0.23	1.56 ± 0.30	11.25 ± 10.06	0.77 ± 0.05
t 值		3.747	-0.079	-1.625	0.650
P 值		0.000	0.937	0.107	0.517

*The percentage gain of very low frequency in male and female were expressed as $M(P_{25}, P_{75})$, 超低频男性和女性增益百分比表示为 $M(P_{25}, P_{75})$ 。Mann-Whitney U test for comparison of very low frequency percentage gain, and two-independent-sample t test for comparison of others, 超低频增益百分比的比较行 Mann-Whitney U 检验, 其余指标的比较行两独立样本的 t 检验

一致。亦有研究得出不同结论, Patel 等^[23]并未发现男性与女性的自发 dCA 存在差异。究其原因, 不同性别之间 dCA 存有差异的原因可能与激素和脑代谢相关, 但未得到验证, 因此, 临床进行 dCA 参数研究时应将性别作为一项潜在影响因素^[6]。

既往数十年间, 血压和脑血流量测量均取得实质性进展。dCA 检查方法主要分为自发 dCA 和诱发 dCA, 前者依赖血压和脑血流量的自然波动, 通常于仰卧位静息态即可完成检测, 但耗时较长; 后者通过刺激-反应方法诱发血压变化, 分析脑血流量动态变化。本研究对比分析不同体位下 dCA 参数(自发 dCA 与诱发 dCA)在超低频、低频、高频 3 个频域内的差异, 结果显示, 直立位 3 个频域内大脑中动脉增益绝对值均低于仰卧位, 超低频和低频频域内相位差亦低于仰卧位。由于相位差由血压与 CBFV 之间的时间差决定, 可消除任意生理变量波幅变化对 dCA 变化的影响, 增益则表示 CBFV 随血压变化的波幅, 因此认为, 相位差是较增益更可靠的 dCA 评价指标^[10]。尽管本研究增益与相位差所得结论不一致, 仍认为仰卧位 dCA 改善, 尚待进一步研究证实。Favre 等^[5]采用 TFA 法在健康人群缓慢呼吸期间评估增益、相位差和脑血管反应性, 也发现仰卧位脑血管反应性和 dCA 均得以改善, 推测可能是由于直立位时为保持相对恒定的脑血流量, 脑血管须扩张方可应对较低的脑灌注压; 而仰卧位时脑与其他部位之间的压力相似, 脑血管阻力升高, 血管收缩增加可改善脑血流自动调节能力^[5,24]。本研究还发现, 超低频和低频频域内直立位大脑中动脉一致性均高于仰卧位, 表明血压与 CBFV 之间的线性关系增强。一项反复深蹲-站立动作强化血压波动试验亦证实上述结论, 与自发血压和脑血流量波动相比, 强化血压波动的频谱功率更高, 超低频频域内一致性更强, 进而可以更好地通过 TFA 法分析增益和相位差; 此外, 诱发血压和脑血流量波动更贴近患者日常生活中体位变化相关振荡, 从而可以更稳定、可靠地评估 dCA^[25]。

本研究发现, 超低频频域内男性与女性各项 dCA 参数无明显差异, 而在低频和高频频率内二者存在一定差异, 提示今后进行 dCA 研究应考虑不同频谱范围内性别差异的影响。主动站立诱发动作可增强血流动力学振荡, 进而增加 TFA 法评估 dCA 的可靠性和稳定性。此外, 体位变化亦可影响脑血流自动调节能力, 仰卧位 dCA 得以改善, 体现出同

一体位下对比分析 dCA 的重要性, 以避免体位变化的混淆效应。然而, 本研究亦存在一定的局限性, 大脑中动脉 CBFV 由管径和脑血流量共同决定, 唯有在管径恒定的前提下, CBFV 的变化才可以反映脑血流量的变化。本研究采用 TCD 测量大脑中动脉 CBFV 不能替代脑血流量, 既往研究显示诱导平均动脉压和 PetCO₂ 适度变化期间, 大脑中动脉管径仅发生微小变化 (< 4%), 但本研究无法排除大脑中动脉管径微小变化的影响^[25]。此外, 本研究样本量较小, 后续尚待进一步扩大样本量验证结论。

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] Claassen JAHR, Thijssen DHJ, Panerai RB, Faraci FM. Regulation of cerebral blood flow in humans: physiology and clinical implications of autoregulation [J]. *Physiol Rev*, 2021, 101:1487-1559.
- [2] Payne S. Cerebral autoregulation: control of blood flow in the brain [M]. Zhong JX, trans. Beijing: China Science and Technology Press, 2022: 1-6. [Payne S. 脑血流自动调节: 从基础到临床 [M]. 钟经馨, 译. 北京: 中国科学技术出版社, 2022: 1-6.]
- [3] Sainbhi AS, Gomez A, Froese L, Slack T, Batson C, Stein KY, Cordingley DM, Alizadeh A, Zeiler FA. Non-invasive and minimally-invasive cerebral autoregulation assessment: a narrative review of techniques and implications for clinical research [J]. *Front Neurol*, 2022, 13:872731.
- [4] Li F, Xing HY, Jin HQ, Sun YC, Peng Q, Sun W, Wang ZX, Huang YN. Development history of cerebral autoregulation [J]. *Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi*, 2021, 21:9-13. [李凡, 邢海英, 金海强, 孙云闯, 彭清, 孙葳, 王朝霞, 黄一宁. 脑血流自动调节研究发展史 [J]. 中国现代神经疾病杂志, 2021, 21:9-13.]
- [5] Favre ME, Lim V, Falvo MJ, Serrador JM. Cerebrovascular reactivity and cerebral autoregulation are improved in the supine posture compared to upright in healthy men and women [J]. *PLoS One*, 2020, 15:e0229049.
- [6] Labrecque L, Rahimaly K, Imhoff S, Paquette M, Le Blanc O, Malenfant S, Drapeau A, Smirl JD, Bailey DM, Brassard P. Dynamic cerebral autoregulation is attenuated in young fit women [J]. *Physiol Rep*, 2019, 7:e13984.
- [7] Koep JL, Bond B, Barker AR, Ruediger SL, Pizzey FK, Coombes JS, Bailey TG. The relationships between age, sex, and cerebrovascular reactivity to hypercapnia using traditional and kinetic-based analyses in healthy adults [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2022, 323:H782-H796.
- [8] Alwathban MR, Aaron SE, Kaufman CS, Barnes JN, Brassard P, Ward JL, Miller KB, Howery AJ, Labrecque L, Billinger SA. Effects of age and sex on middle cerebral artery blood velocity and flow pulsatility index across the adult lifespan [J]. *J Appl Physiol* (1985), 2021, 130:1675-1683.
- [9] Wang X, Krishnamurthy S, Evans J, Bhakta D, Justice L, Bruce E, Patwardhan A. Transfer function analysis of gender-related differences in cerebral autoregulation [J]. *Biomed Sci Instrum*, 2005, 41:48-53.
- [10] Panerai RB, Brassard P, Burma JS, Castro P, Claassen JA, van Lieshout JJ, Liu J, Lucas SJ, Minhas JS, Mitsis GD, Nogueira

- RC, Ogoh S, Payne SJ, Rickards CA, Robertson AD, Rodrigues GD, Smirl JD, Simpson DM; Cerebrovascular Research Network (CARNet). Transfer function analysis of dynamic cerebral autoregulation: a CARNet white paper 2022 update[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2023, 43:3-25.
- [11] Wan Y, Teng X, Li S, Yang Y. Application of transcranial Doppler in cerebrovascular diseases[J]. Front Aging Neurosci, 2022, 14:1035086.
- [12] Gomez A, Batson C, Froese L, Sainbhi AS, Zeiler FA. Utility of transcranial Doppler in moderate and severe traumatic brain injury: a narrative review of cerebral physiologic metrics[J]. J Neurotrauma, 2021, 38:2206-2220.
- [13] Numan T, Bain AR, Hoiland RL, Smirl JD, Lewis NC, Ainslie PN. Static autoregulation in humans: a review and reanalysis[J]. Med Eng Phys, 2014, 36:1487-1495.
- [14] Chi NF, Hu HH, Chan L, Wang CY, Chao SP, Huang LK, Ku HL, Hu CJ. Impaired cerebral autoregulation is associated with poststroke cognitive impairment[J]. Ann Clin Transl Neurol, 2020, 7:1092-1102.
- [15] Liu Z, Ma H, Guo ZN, Wang L, Qu Y, Fan L, Liu X, Liu J, Zhu Y, Yang Y. Impaired dynamic cerebral autoregulation is associated with the severity of neuroimaging features of cerebral small vessel disease[J]. CNS Neurosci Ther, 2022, 28:298-306.
- [16] Neurology Branch, Jilin Medical Association; Jilin Stroke Association. Expert consensus on the clinical application of dynamic cerebral autoregulation assessment in neurological diseases (2021)[J]. Zhonghua Nao Xue Guan Bing Za Zhi (Dian Zi Ban), 2021, 15:140-152.[吉林省医学会神经病学分会, 吉林省卒中学会. 动态脑血流自动调节功能评估在神经系统疾病中的临床应用专家共识(2021)[J]. 中华脑血管病杂志(电子版), 2021, 15:140-152.]
- [17] Nogueira RC, Aries M, Minhas JS, H Petersen N, Xiong L, Kainerstorfer JM, Castro P. Review of studies on dynamic cerebral autoregulation in the acute phase of stroke and the relationship with clinical outcome[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2022, 42:430-453.
- [18] Chen SW, Chen HX, Xing YQ. Research progress on the relationship between cerebral venous system diseases and cerebral autoregulation[J]. Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi, 2022, 22:455-459.[陈松伟, 陈虹秀, 邢英琦. 脑静脉系统疾病与脑血流自动调节研究进展[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2022, 22:455-459.]
- [19] Olsen MH, Riberholt CG, Mehlsen J, Berg RM, Møller K. Reliability and validity of the mean flow index (Mx) for assessing cerebral autoregulation in humans: a systematic review of the methodology[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2022, 42:27-38.
- [20] Riberholt CG, Olsen MH, Skovgaard LT, Berg RM, Møller K, Mehlsen J. Reliability of the transcranial Doppler ultrasound-derived mean flow index for assessing dynamic cerebral autoregulation in healthy volunteers[J]. Med Eng Phys, 2021, 89:1-6.
- [21] Liu X, Czosnyka M, Donnelly J, Cardim D, Cabeleira M, Lalou DA, Hu X, Hutchinson PJ, Smielewski P. Assessment of cerebral autoregulation indices: a modelling perspective[J]. Sci Rep, 2020, 10:9600.
- [22] Vavilala MS, Kincaid MS, Muangman SL, Suz P, Rozet I, Lam AM. Gender differences in cerebral blood flow velocity and autoregulation between the anterior and posterior circulations in healthy children[J]. Pediatr Res, 2005, 58:574-578.
- [23] Patel N, Panerai RB, Haunton V, Katsogridakis E, Saeed NP, Salinet A, Brodie F, Syed N, D'sa S, Robinson TG. The Leicester cerebral haemodynamics database: normative values and the influence of age and sex[J]. Physiol Meas, 2016, 37:1485-1498.
- [24] Aaslid R, Lindegaard KF, Sorteberg W, Normes H. Cerebral autoregulation dynamics in humans[J]. Stroke, 1989, 20:45-52.
- [25] Claassen JA, Levine BD, Zhang R. Dynamic cerebral autoregulation during repeated squat - stand maneuvers[J]. J Appl Physiol (1985), 2009, 106:153-160.

(收稿日期:2023-05-18)

(本文编辑:柏钰)

· 小词典 ·

中英文对照名词词汇(七)

- 直接胆红素 direct bilirubin(DBIL)
- 直立不耐受 orthostatic intolerance(OI)
- 中国精神障碍分类与诊断标准第3版
Classification and Diagnostic Criteria of Mental Disorders in China Third Edition(CCMD-3)
- 中央杏仁核 central nucleus of the amygdala(CELC)
- 终纹床核 bed nucleus of stria terminalis(BNST)
- 肿瘤坏死因子- α tumor necrosis factor- α (TNF- α)
- 肿瘤基因组学图谱计划 The Cancer Genome Atlas(TCGA)
- 周期性肢体运动障碍
periodic limb movement disorder(PLMD)
- 主要组织相容性复合物 I
major histocompatibility complex I (MHC I)
- 转录相关酸性卷曲蛋白 3
transforming acidic coiled coil protein 3(TACC3)
- 自动调节指数 autoregulation index(ARI)
- 总胆红素 total bilirubin(TBIL)
- 总睡眠时间 total sleep time(TST)
- 阻塞性睡眠呼吸暂停 obstructive sleep apnea(OSA)
- 阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征
obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome(OSAHS)
- 阻塞性睡眠呼吸暂停与失眠共病
comorbid insomnia and obstructive sleep apnea(COMISA)
- 阻塞性睡眠呼吸暂停综合征
obstructive sleep apnea syndrome(OSAS)
- 组蛋白去乙酰化酶 histone deacetylases(HDACs)
- 左旋多巴日等效剂量
levodopa equivalent daily dose(LEDD)