

# 颈动脉内膜剥脱术患者围术期脑灌注相关力学因素分析

郭蕾<sup>1</sup>,熊力<sup>2</sup>,蒋崇贵<sup>2</sup>,郭梅玲<sup>2</sup>,王振宇<sup>2</sup>,李春玲<sup>2</sup>

1. 成都市新都区人民医院神经内科,四川 成都 610500;2. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)神经外科,四川 成都 610072

**【摘要】** 目的 基于计算流体力学(CFD)分析颈动脉内膜剥脱术(CEA)患者围术期的血流动力学特征。方法 纳入2023年1月至2024年12月于四川省人民医院收治的50例行CEA患者。通过CFD模型对比患者围术期颈动脉血流动力学及脑灌注变化情况。采用Pearson相关性分析及多元线性回归分析探讨与脑灌注变化相关力学因素。结果 CEA术后壁面剪切力(WSS)及壁剪切力比值(WSSR)均显著降低,而跨病变压力比(PR)明显增加( $P<0.05$ )。Pearson相关性结果显示,脑灌注变化率与PR变化率和脑氧饱和度变化率呈正相关,而与WSS变化率和WSSR变化率呈负相关( $P<0.05$ );多元线性回归分析结果显示,PR变化率高组( $B=0.187, P=0.046$ )、局部脑氧饱和度变化率中组(中组 $B=0.197, P=0.045$ ;高组 $B=0.265, P=0.004$ )显著改善脑灌注,而WSS变化率高组显著降低脑灌注( $B=-0.263, P=0.006$ )。结论 CEA术后PR、局部脑氧饱和度增加以及WSS降低与脑灌注改善显著相关,提示血流动力学参数可作为评估手术效果的有效指标。

**【关键词】** 颈动脉狭窄;颈动脉内膜剥脱术;计算流体力学;脑灌注

**【中图分类号】** R743.3

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1672-6170(2026)03-0115-05

**Analysis of hemodynamic factors related to perioperative cerebral perfusion in patients undergoing carotid endarterectomy** GUO Lei<sup>1</sup>, XIONG Li<sup>2</sup>, JIANG Chong-gui<sup>2</sup>, GUO Mei-ling<sup>2</sup>, WANG Zhen-yu<sup>2</sup>, LI Chun-ling<sup>2</sup> 1. Department of Neurology, Xindu District People's Hospital of Chengdu, Chengdu 610500, China; 2. Department of Neurosurgery, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital (Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610072, China

**【Corresponding author】** LI Chun-ling

**【Abstract】** **Objective** To analyze perioperative hemodynamic characteristics in of patients undergoing carotid endarterectomy (CEA) using computational fluid dynamics (CFD). **Methods** Fifty patients treated with CEA in our hospital from January 2023 to December 2024 were enrolled. Hemodynamic and cerebral perfusion changes before and after surgery were compared using a CFD model. Hemodynamic factors related to cerebral perfusion changes were explored using Pearson correlation and multivariate linear regression analysis. **Results** After CEA, both wall shear stress (WSS) and wall shear stress ratio (WSSR) were significantly decreased, while the trans-lesion pressure ratio (PR) was markedly increased ( $P<0.05$ ). Correlation analysis indicated that the change in cerebral perfusion rate was positively correlated with the change in trans-lesion PR and the change in regional cerebral oxygen saturation (rScO<sub>2</sub>), while it was negatively correlated with the change in WSS and the change in WSSR ( $P<0.05$ ). Multivariate linear regression further demonstrated that cerebral perfusion was significantly improved in the high PR change group ( $B=0.187, P=0.046$ ) and the moderate/high rScO<sub>2</sub> change group (moderate:  $B=0.197, P=0.045$ ; high:  $B=0.265, P=0.004$ ). However, perfusion was significantly reduced in the high DRWSS change group ( $B=-0.263, P=0.006$ ). **Conclusions** After CEA, PR, increased rScO<sub>2</sub> and decreased WSS are significantly correlated with improved cerebral perfusion. These suggest that hemodynamic parameters can serve as effective indicators for evaluating surgical outcomes.

**【Key words】** Carotid artery stenosis; Carotid endarterectomy; Computational fluid dynamics; Cerebral perfusion

颈动脉狭窄造成的脑卒中累积风险在一年约15%,两年约26%,五年约30%<sup>[1]</sup>。颈动脉内膜切除术(carotid endarterectomy, CEA)是颈动脉狭窄患者脑卒中二级预防的首选干预措施。然而,CEA术后由于血流动力学障碍可能会发生脑高灌注损害,是围术期的致命并发症,严重影响患者长期生存质量<sup>[2]</sup>。当前,临床存在多种用于评估围术期脑血流

动力学状态的技术,但不同监测手段各有其优势和局限性<sup>[3]</sup>。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)作为一种定量计算血流动力学的工具,可应用于可视化和定量分析多种血管病变的血流情况,已成为研究前沿。CFD定量分析可获得血管壁剪切力(wall shear stress, WSS)、血管狭窄部位与狭窄前部位的壁剪切力比值(wall shear stress ratio, WSSR)、跨病变压力比(pressure ratio, PR)、阻力指数(resistance index, RI)等高级力学参数<sup>[4]</sup>。现有的CFD相关研究仍主要集中在动脉粥样硬化及其斑块特征的静态评估上,对围术期脑灌注动态变化的系统性监测尚未得到充分研究。因此,本研究

**【基金项目】** 四川省科技厅青年科学基金 B 类项目(编号:2026NSFSC1639);四川省科技厅重点研发项目(编号:2023YSF0274)

**【通讯作者】** 李春玲

将利用局部脑组织氧饱和度 (regional cerebral oxygen saturation, rScO<sub>2</sub>)、颈动脉超声、颈动脉 CT 血管成像及头颅灌注成像等多种监测手段,并结合 CFD 分析,系统评估 CEA 患者围术期脑灌注的动态变化及其潜在影响因素,以期降低围术期并发症的风险,改善患者预后。

## 1 对象与方法

**1.1 研究对象** 采用前瞻性队列研究设计,连续纳入于 2023 年 1 月至 2024 年 11 月在四川省人民医院住院接受 CEA 治疗的患者。纳入标准:18 岁以上成年人;符合 CEA 手术适应证<sup>[5]</sup>;患者及其家属知情同意。排除标准:过去 30 天内曾发生严重心脑血管意外;严重凝血功能障碍者;伴有严重肺部和肝肾不全者。本研究将 CEA 患者分成术前及术后两组。研究已在 ClinicalTrials.gov 平台注册(注册号:NCT06294496);经四川省医学科学院·四川省人民医院伦理委员会审批(2023 年第 273 号)。

**1.2 资料收集** 采集 CEA 患者的临床数据,包括人口学特征,既往吸烟、饮酒、糖尿病、高脂血症、高血压病史。颈动脉狭窄特征包括左侧颈动脉或者右侧颈动脉狭窄、症状性或者无症状性颈动脉狭窄、狭窄严重程度。所有患者行术前 3 天内和术后 3 天内行 rScO<sub>2</sub> 监测、颈动脉超声、颈部 CT 血管成像及头颅 CT 灌注成像检查。采用脑部区域组织氧饱和度监测仪(型号 01-06-X100,江西依露得力医疗科技有限公司),对患者术侧及对侧额颞部

行 rScO<sub>2</sub> 监测。

**1.3 围术期管理** 患者至少术前一周开始每天服用阿司匹林 100 mg。所有 CEA 手术由高年资神经外科医生完成,采用外翻式手术方式。围术期收缩压管理范围在 120~140 mmHg。术后患者于神经重症监护室继续治疗至少 24 小时,观察患者意识、四肢运动、感觉等神经功能。术后继续服用阿司匹林抗血小板治疗 1~3 个月,根据患者个体情况停药。

## 1.4 血流动力学建模和血流动力学特征的量化

利用 Mimics Research 21.0 软件对颈动脉 CTA 图像进行了分割、3D 重建以及整体光滑处理。如图 1 所示,首先对导入的医学影像进行灰度调整,并选择合适的阈值进行图像分割,生成三维模型。使用 Materialise 3-matic 13.0 软件对三维重建模型进行平滑处理、血管切割、错误检测及修补。采用 ANSYS-FLUENT(2022 R1) 软件对生成网格的三维模型进行血流动力学仿真。最后,使用 CFD-Post 软件对模型进行分析和处理,导出颈动脉狭窄部位前、狭窄部位及狭窄部位后三个位置截面处的高级力学参数,并通过云图及流线可视化。CFD 模型上导出的 WSS、PR、WSSR 等参数可量化每个颈动脉狭窄部位的压力和剪切应力的相对变化。其中,WSS 代表颈动脉狭窄处的剪切应力,PR 为颈动脉狭窄后压力与颈动脉狭窄前压力的比值,WSSR 为颈动脉狭窄处 WSS 与颈动脉狭窄前 WSS 的比值。

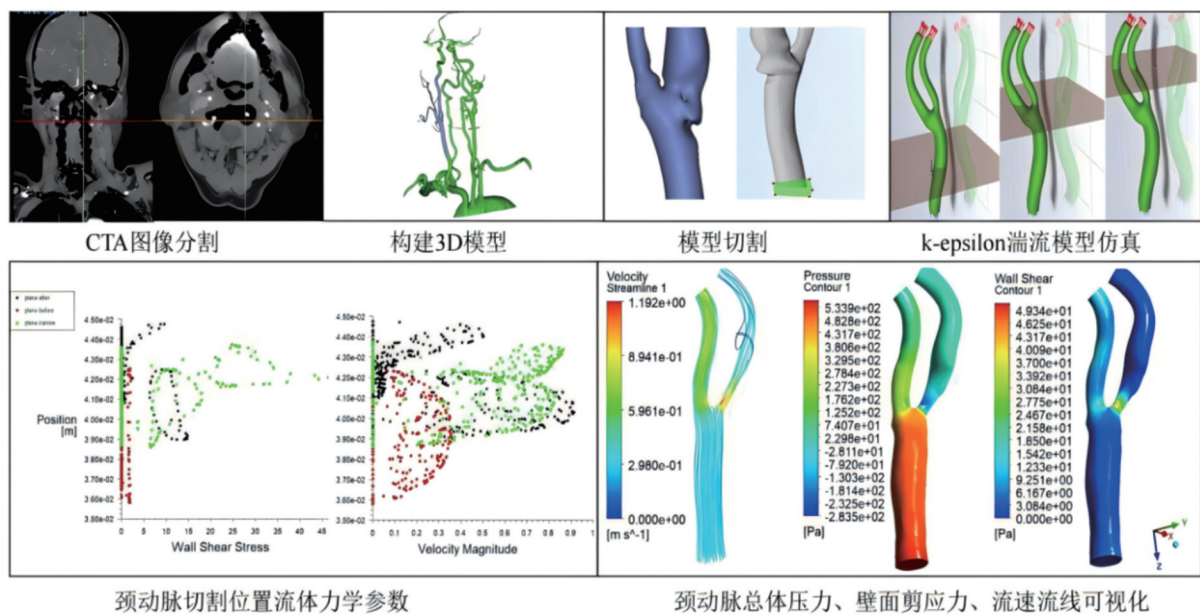


图 1 颈动脉计算流体力学建模的工作流程

**1.5 围术期血流动力学参数变化率定义** 脑灌注改变用 CEA 术侧大脑中动脉供血区围术期脑血流量 (cerebral blood flow, CBF) 变化率表示, CBF 变化

率 = (术后 CBF - 术前 CBF) / 术前 CBF × 100%<sup>[6]</sup>。采用以下公式计算患者围术期血流动力学参数变化率 (difference ratio, DR): ① DR<sub>rScO<sub>2</sub></sub> = (术后 rScO<sub>2</sub> -

术前  $rScO_2$ )/术前  $rScO_2 \times 100\%$ ; ② 壁面剪切力变化率(DRWSS) = (术后 WSS-术前 WSS)/术前 WSS  $\times 100\%$ ; ③ 跨病变压力比变化率(DRPR) = (术后 PR-术前 PR)/术前 CBF  $\times 100\%$ ; ④ 壁面剪切力比变化率(DRWSSR) = (术后 WSSR-术前 WSSR)/术前 WSSR  $\times 100\%$ 。

**1.6 统计学方法** 采用 SPSS 23.0 及 R4.3.2 软件对数据进行了统计分析和可视化。计数资料以例数(%)表示。正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差表示,偏态分布的计量资料用中位数(Q1, Q3)表示。组间比较满足方差齐性者用配对  $t$  检验,不满足方差齐性则采用 Wilcoxon 配对符号秩检验。相关性分析采用 Pearson 相关分析法。基于 AIC 准则的双向逐步回归筛选变量,采用多元线性回归分析,评估力学参数与脑灌注变化之间的独立关联性。模型采用 Shapiro-Wilk 检验评估残差正态性, Durbin-Watson 检验检测残差自相关,并计算 VIF 评估多重共线性。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

表 1 50 例患者 CEA 治疗前后血流动力学参数比较

参数		术前	术后	统计量	P
颈动脉超声参数	收缩峰期速度(m/s)	2.05(1.70, 2.70)	0.66(0.50, 0.80)	$Z = 6.154$	$< 0.001$
	舒张末期速度(m/s)	0.54(0.40, 0.80)	0.21(0.20, 0.25)	$Z = 6.087$	$< 0.001$
	平均速度(m/s)	1.12(0.90, 1.30)	0.38(0.26, 0.44)	$Z = 6.154$	$< 0.001$
	阻力指数	0.71(0.70, 0.80)	0.66(0.60, 0.70)	$Z = 2.596$	0.009
脑血流量参数	术侧 CBF[ml/(100g·min)]	38.49 $\pm$ 4.57	53.06 $\pm$ 8.01	$t = -10.5$	$< 0.001$
	对侧 CBF[ml/(100g·min)]	41.32 $\pm$ 3.78	43.26 $\pm$ 3.29	$t = -3.344$	0.002
	rCBF	0.95 $\pm$ 0.11	1.22 $\pm$ 0.22	$t = -7.979$	$< 0.001$
局部脑组织氧饱和度参数	术侧 $rScO_2$ (%)	69.00 $\pm$ 4.00	71.00 $\pm$ 7.00	$t = 2.47$	0.017
	对侧 $rScO_2$ (%)	71.00 $\pm$ 5.00	69.00 $\pm$ 5.00	$t = -1.768$	0.083
计算流体力学参数	WSS(Pa)	1.47(0.70, 1.90)	0.39(0.30, 0.60)	$Z = 6.058$	$< 0.001$
	WSSR	2.32(1.40, 3.80)	1.32(0.80, 1.90)	$Z = 5.054$	$< 0.001$
	PR	0.62(0.40, 0.70)	0.77(0.60, 0.90)	$Z = 5.299$	$< 0.001$

rCBF: 相对脑血流量

**2.3 脑灌注改变与血流动力学参数变化率的相关性分析** 围术期力学参数变化率显示, WSS 术后减少 63.50%(42.00%, 85.0%), WSSR 减少 40.00%(21.00%, 54.00%), 而  $rScO_2$  增加 2.00%(1.60%, 9.10%), CBF 增加 31.00%(21.50%, 50.20%), PR 增加 37.00%(8.00%, 84.00%)。DRCBF 与 DRPR 呈中等正相关, 与 DR $rScO_2$  呈弱正相关, 而与 DRWSS 和 DRWSSR 呈弱负相关。见表 2。

表 2 脑灌注变化与血流动力学参数变化率的相关性分析

参数	r	95%CI	P
DRPR	0.575	0.351~0.738	$< 0.001$
DR $rScO_2$	0.305	0.094~0.576	0.031
DRWSS	-0.376	-0.589~0.113	0.007
DRWSSR	-0.385	-0.604~0.117	0.006

## 2 结果

**2.1 CEA 患者基线特征** 本研究共纳入 50 例接受 CEA 治疗的患者。患者的平均年龄为 72 岁, 男 34 例, 女 16 例。其中高血压、糖尿病、高脂血症患者分别占 84%、56%、64%, 吸烟者占 74%, 饮酒者占 40%, 冠心病患者占 10%。左侧颈动脉狭窄占 48%, 症状性颈内动脉病变占 66%。患者的颈动脉狭窄严重程度平均水平为 76%。

**2.2 CEA 术前及术后血流动力学参数比较** CEA 术后, 颈动脉超声示 CEA 术区的收缩峰期速度、舒张末期速度、平均速度及 RI 均明显降低( $P < 0.05$ ); 头颅灌注成像示, 术侧 CBF、对侧 CBF 及 rCBF 较术前显著增加( $P < 0.05$ )。  $rScO_2$  监测显示, 术侧  $rScO_2$  在 CEA 术后显著增加( $P = 0.017$ ), 而对侧术后  $rScO_2$  差异无统计学意义( $P = 0.083$ )。计算流体力学参数显示, WSS 及 WSSR 在术后显著降低( $P < 0.001$ ), 而 PR 较术前显著增加( $P < 0.001$ )。见表 1。

**2.4 脑灌注改变相关力学因素的多元线性回归分析** 为进一步探讨各力学参数对脑灌注改变的独立影响, 采用以 DRCBF 为因变量的多元线性回归模型对相关力学因素进行分析。通过双向逐步回归法筛选变量, 初始全模型纳入 DRPR、DRWSS、DRWSSR 和 DR $rScO_2$  的三分类变量(低/中/高), AIC 值为 14.52。经过变量筛选后, 最终模型剔除了 DRWSSR( $\Delta AIC = 3.50$ ), AIC 降至 11.01, 同时调整 R2 从 0.40 提升至 0.42, 表明模型精简后拟合效果显著改善。最终模型结果见表 3, DRPR 高组比低组显著增加脑灌注( $B = 0.187, 95\% CI: 0.003 \sim 0.372, P = 0.046$ ), DRWSS 高组比低组显著降低脑灌注( $B = -0.263, 95\% CI: -0.448 \sim -0.079, P = 0.006$ ), 而 DR $rScO_2$  中、高组均比低组显著增加脑

灌注(中组  $B=0.197, P=0.045$ ; 高组  $B=0.265, P=0.004$ )。模型整体解释力良好( $R^2=0.49$ , 调整  $R^2=0.42$ ),  $F$  检验显示联合显著性( $F=6.84, P<0.001$ ), 残差标准误为 0.25。模型诊断显示残差服

从正态分布(Shapiro-Wilk  $P=0.110$ )、无自相关( $DW=1.95, P=0.12$ ), 且不存在多重共线性问题(VIF 最大值 1.29)。

表 3 脑灌注改变相关力学因素多元线性回归分析结果

变量		B	95%CI	SE	t	P	VIF	容差
截距		0.324	0.154~0.493	0.084	3.867	<0.001	-	-
DRPR 分组	中 vs 低	-0.056	-0.236~0.125	0.09	-0.622	0.537	1.27	0.79
	高 vs 低	0.187	0.003~0.372	0.091	2.051	0.046		
DRWSS 分组	中 vs 低	0.003	-0.177~0.184	0.089	0.038	0.97	1.2	0.84
	高 vs 低	-0.263	-0.448~-0.079	0.092	-2.871	0.006		
DRrScO <sub>2</sub> 分组	中 vs 低	0.197	0.004~0.389	0.095	2.06	0.045	1.29	0.78
	高 vs 低	0.265	0.089~0.441	0.087	3.037	0.004		

**2.5 围术期并发症及临床预后** CEA 术后第一天有 1 例患者出现颈部手术切口下方局限性皮下血肿(约 3 cm×2 cm, 质地柔软, 无活动性出血), 经局部加压包扎 48 小时后血肿逐渐吸收; 2 例患者出现术侧搏动性头痛(视觉模拟评分 5~6 分), 考虑与脑血管血流动力学改变相关, 口服对乙酰氨基酚缓释片(650 mg q8h)镇痛, 监测并控制收缩压<140 mmHg, 患者症状逐渐缓解。以上 3 例患者均于术后第二天由神外 ICU 转回病房, 未遗留后遗症。所有患者围术期未发生肺炎、脑梗死、脑出血、心血管事件或死亡等严重并发症。术后 30 天随访显示无新发脑梗死或脑出血事件; 术后 6 个月随访期间, 所有患者均未出现同侧缺血性脑卒中复发或脑出血。

### 3 讨论

**3.1 颈动脉血流动力学参数的术后改善** 本研究表明, CEA 术后颈动脉的收缩峰期速度、舒张末期速度、平均速度和 RI 显著降低, 表明随着血管狭窄严重程度降低, 颈动脉血流得到改善。颈动脉血流速度的变化与术侧 rScO<sub>2</sub>、CBF 和 rCBF 的增加相符合, 反映了大脑中动脉区域灌注的提高。这些结果与既往研究发现相符合<sup>[7,8]</sup>, 验证了颈动脉超声、头颅 CT 灌注成像及局部脑氧饱和度监测在当前临床实践中的持续适用性。

**3.2 血流动力学参数变化的病理生理意义** 近年来, 血流动力学研究逐步聚焦于生物力学因素对血管结构与功能的影响机制, 其中以 WSS 为代表的剪切应力在动脉粥样硬化病变的发生发展中起着核心作用<sup>[9,10]</sup>。来自 79 例健康志愿者的 CFD 模型显示颈动脉 WSS 均值为 0.66 Pa<sup>[11]</sup>, 显著低于本研究颈动脉狭窄患者 WSS 中位水平 1.47 Pa。这可能与颈动脉狭窄的生物力学机制有关; WSS 是血流对动脉壁施加的切向力, 受血液黏度和剪切速率的影响, 每次心跳产生的脉动剪切力直接影响血管内皮

细胞功能<sup>[12]</sup>。CEA 术后, 颈动脉狭窄解除、流速减缓、WSS 显著降低, 这种生理回归可能减少对血管壁的不利机械刺激, 改善内皮细胞的功能状态, 有利于维持血管稳定性和灌注连续性。此外, WSSR 是衡量剪切应力空间不均匀性的重要指标, 高 WSSR 意味着剪切力分布不均, 容易诱导血管局部涡流和紊流, 从而激活炎症通路及基质金属蛋白酶表达, 导致内皮损伤与不稳定斑块形成<sup>[13]</sup>。本研究中, CEA 术后 WSSR 明显下降, 提示血管内剪切应力更加均匀分布, 这种应力环境的改善可能减少术后血栓事件的风险。

**3.3 力学参数与脑灌注改变的相关性** 本研究结合 CFD 分析, 通过相关性分析揭示了上述多种血流动力学参数与脑灌注变化的复杂关系, 为进一步理解 CEA 术后的血流动力学变化机制提供了新的视角。本研究发现 DRCBF 与 DRPR 和 DRrScO<sub>2</sub> 呈正相关关系, 表明 PR 和 rScO<sub>2</sub> 的增加与脑灌注的改善密切相关, 尤其是 PR。PR 反映狭窄病变上下游之间的压力差异, 其升高代表血流阻力降低, 顺应性改善, 是狭窄解除后血流重分布和灌注改善的直观体现<sup>[14,15]</sup>。本研究发现, 术后 PR 显著升高, 与脑灌注变化呈正相关, 并在多元回归中成为独立预测因子, 提示 PR 可作为术后灌注改善的敏感指标。值得注意的是, 其他文献亦报道, 术后 PR 的升高与中动脉平均流速的增加呈线性关系, 反映出 PR 变化可能是灌注状态改善的代偿性机制之一<sup>[16]</sup>。此外, CEA 术后血管壁顺应性和几何结构恢复至近似生理状态, 进一步促进 PR 的提升和血流的层流化。与现有文献对比, 本研究结果不仅验证了 Malek 等提出的 WSS“生理窗”理论, 还首次报道了 DRPR 与脑灌注改善的正相关性, 为 CEA 术后脑血流调控提供了新的监测指标<sup>[17]</sup>。

本研究还强调了 WSS 和 WSSR 变化与脑灌注

变化的负相关关系,不仅表明了剪切应力异常的解除,还可能提示高剪切状态下内皮细胞功能障碍对灌注的抑制效应<sup>[18]</sup>。现有研究表明,WSS 通过调节内皮细胞功能影响脑血管张力,当 WSS 显著低于正常水平时可能诱发内皮功能障碍,刺激血栓形成,这与本研究结果一致<sup>[19]</sup>。当 WSS 恢复至更温和、稳定的水平时,血流速度虽降低但分布更加均匀,从而有助于脑灌注持续性和脑血管稳态的维持。WSS 的降低也提示涡流减弱和血流方向的一致性增强,可能减少术后血栓形成风险并促进内皮修复。

在围术期管理方面,本研究考虑到血压作为重要混杂因素对脑灌注的影响<sup>[20]</sup>,患者围术期收缩压管理在 120~140 mmHg,CEA 术后所有患者均未观察到明显高灌注损伤,再次强调了血压管理对于预防术后并发症的重要性。

综上,CEA 术后颈动脉血流动力学参数显著改善,术侧脑灌注显著提升。术后 WSS 降低和 PR 增加与脑灌注的改善密切相关。结合 CFD 分析和多模式血流动力学监测可以为 CEA 患者的管理提供有效的优化管理策略。然而,未来研究需要延长随访时间,并结合更系统的灌注评估,以明确脑灌注变化对远期卒中预防的影响。

#### 【参考文献】

- [1] Bonati LH, Jansen O, de Borst GJ, et al. Management of atherosclerotic extracranial carotid artery stenosis[J]. *Lancet Neurol*, 2022, 21(3):273-283.
- [2] Opaskar A, Shammassian B, Yaghmoor B, et al. Postcarotid endarterectomy reperfusion injury and hemorrhage[J]. *Stroke*, 2024, 55(7):195-198.
- [3] Naredi S. Are available methods for assessment of cerebral perfusion sufficient for scientific studies or not [J]. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2020, 64(5):566-567.
- [4] Berger T, Kreibich M. Computational fluid dynamics: a promising diagnostic tool[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2021, 60(2):392-393.
- [5] 陈忠, 杨耀国. 颈动脉狭窄诊治指南[J]. *中国血管外科杂志(电子版)*, 2017, 9(3):169-175.
- [6] 韩芸峰, 侯超凡, 王涛, 等. 同期颈动脉内膜切除术联合冠状动脉旁路移植术后脑灌注改变的相关分析[J]. *中国脑血管病杂志*, 2022, 19(3):148-153.
- [7] Alilet A, Petit P, Devaux B, et al. Ultrasound-guided intermediate cervical block versus superficial cervical block for carotid artery endarterectomy: The randomized-controlled CERVECCHO trial[J]. *Anaesth Crit Care Pain Med*, 2017, 36(2):91-95.
- [8] Duarte-Gamas L, Pereira-Neves A, Sousa J, et al. The diagnostic accuracy of intra-operative near infrared spectroscopy in carotid artery endarterectomy under regional anaesthesia: systematic review and meta-analysis[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2021, 62(4):522-531.
- [9] Wong KKL, Wu J, Liu G, et al. Coronary arteries hemodynamics: effect of arterial geometry on hemodynamic parameters causing atherosclerosis[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2020, 58(8):1831-1843.
- [10] Saqr KM, Rashad S, Tupin S, et al. What does computational fluid dynamics tell us about intracranial aneurysms? A meta-analysis and critical review[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2020, 40(5):1021-1039.
- [11] Schultz J, van den Hoogen IJ, Kuneman JH, et al. Coronary computed tomography angiography-based endothelial wall shear stress in normal coronary arteries [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2023, 39(2):441-450.
- [12] Himburg HA, Dowd SE, Friedman MH. Frequency-dependent response of the vascular endothelium to pulsatile shear stress[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2007, 293(1):H645-H653.
- [13] Ji Q, Wang YL, Xia LM, et al. High shear stress suppresses proliferation and migration but promotes apoptosis of endothelial cells co-cultured with vascular smooth muscle cells via down-regulating MAPK pathway[J]. *J Cardiothorac Surg*, 2019, 14(1):216-219.
- [14] Azar D, Torres WM, Davis LA, et al. Geometric determinants of local hemodynamics in severe carotid artery stenosis[J]. *Comput Biol Med*, 2019, 11(4):34-36.
- [15] Han YF, Liu WH, Chen XL, et al. Severity assessment of intracranial large artery stenosis by pressure gradient measurements: A feasibility study [J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2016, 88(2):255-261.
- [16] Nam HS, Scalzo F, Leng X, et al. Hemodynamic impact of systolic blood pressure and hematocrit calculated by computational fluid dynamics in patients with intracranial atherosclerosis[J]. *J Neuroimaging*, 2016, 26(3):331-338.
- [17] Malek AM, Alper SL, Izumo S. Hemodynamic shear stress and its role in atherosclerosis[J]. *JAMA*, 1999, 282(21):2035-2042.
- [18] Samady H, Eshtehardi P, McDaniel MC, et al. Coronary artery wall shear stress is associated with progression and transformation of atherosclerotic plaque and arterial remodeling in patients with coronary artery disease[J]. *Circulation*, 2011, 124(7):779-788.
- [19] Compagne KCJ, Dilba K, Postema EJ, et al. Flow patterns in carotid webs: a patient-based computational fluid dynamics study[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40(4):703-708.
- [20] Galyfos G, Sianou A, Filis K. Cerebral hyperperfusion syndrome and intracranial hemorrhage after carotid endarterectomy or carotid stenting: a meta-analysis[J]. *J Neurol Sci*, 2017, 38(1):74-82.

(收稿日期:2025-10-28;修回日期:2025-09-05)

(本文编辑:林 贇)