



doi:10.7659/j.issn.1005-6947.250587  
http://dx.doi.org/10.7659/j.issn.1005-6947.250587  
China Journal of General Surgery, 2025, 34(12):2586-2595.

· 动脉疾病专题研究 ·

## 经颅多普勒超声监测在颈动脉内膜切除术中的应用价值： 单中心回顾性研究

张雄<sup>1,2</sup>, 邱剑<sup>1,2</sup>, 黎明<sup>1,2</sup>, 李全明<sup>1,2</sup>, 舒畅<sup>1,2,3</sup>, 何昊<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学湘雅二医院 血管外科, 湖南 长沙 410011; 2. 中南大学血管病研究所, 湖南 长沙 410011; 3. 中国医学科学院阜外医院 血管外科, 北京 100037)

### 摘要

**背景与目的:** 颈动脉内膜切除术 (CEA) 是治疗颈动脉狭窄的主要手段, 但术中血流阻断及术后再灌注可能导致脑梗死及脑高灌注综合征 (CHS) 等神经系统并发症。如何在围手术期实时、动态评估脑灌注状态并指导个体化管理, 仍缺乏统一有效的监测手段。本研究旨在评估经颅多普勒超声 (TCD) 监测在 CEA 围手术期安全性保障及远期预后改善中的临床价值。

**方法:** 回顾性分析 2022 年 2 月—2024 年 12 月在中南大学湘雅二医院血管外科接受 CEA 的患者资料。根据围手术期是否应用 TCD 监测分为 TCD 组和非 TCD 组。比较两组患者的基线特征、围手术期处理、并发症发生情况及远期随访结局, 并对 TCD 监测下脑血流动力学变化进行分析。

**结果:** 共纳入 53 例患者, 其中 TCD 组 25 例, 非 TCD 组 28 例。两组患者在年龄、性别及主要危险因素方面差异均无统计学意义 (均  $P>0.05$ )。手术时间、住院时间及术中转流使用率在两组间差异均无统计学意义 (均  $P>0.05$ )。术后 30 d 内, TCD 组未发生短暂性脑缺血发作 (TIA) 及 CHS, 非 TCD 组分别发生 2 例 TIA 和 3 例 CHS。随访期间, TCD 组未发生不良事件, 非 TCD 组发生 2 例不良事件。Kaplan-Meier 分析显示, TCD 组 3.5 年内无不良事件生存率明显高于非 TCD 组 ( $P=0.047$ )。

**结论:** CEA 术中应用 TCD 监测与更优的远期无不良事件生存率显著相关。TCD 可通过实时评估脑血流动力学变化, 识别低灌注及脑高灌注高危患者, 并指导围手术期精细化管理, 具有重要的临床应用价值。

### 关键词

颈动脉狭窄; 颈动脉内膜切除术; 超声检查, 多普勒, 经颅; 血流动力学  
中图分类号: R654.3

## Clinical value of transcranial Doppler monitoring in carotid endarterectomy: a single-center retrospective study

ZHANG Xiong<sup>1,2</sup>, QIU Jian<sup>1,2</sup>, LI Ming<sup>1,2</sup>, LI Quanming<sup>1,2</sup>, SHU Chang<sup>1,2,3</sup>, HE Hao<sup>1,2</sup>

(1. Department of Vascular Surgery, the Second Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410011, China; 2. Institute of Vascular Diseases, Central South University, Changsha 410011, China; 3. Center of Vascular Surgery, Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Science and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China)

### Abstract

**Background and Aims:** Carotid endarterectomy (CEA) is a primary treatment for carotid artery

**基金项目:** 湖南省自然科学基金资助项目 (2024JJ9215)。

**收稿日期:** 2025-10-22; **修订日期:** 2025-12-04。

**作者简介:** 张雄, 中南大学湘雅二医院博士研究生, 主要从事外周血管及主动脉疾病方面的研究。

**通信作者:** 何昊, Email: hehao6868@csu.edu.cn

stenosis; however, intraoperative carotid clamping and postoperative reperfusion may lead to neurological complications such as cerebral infarction and cerebral hyperperfusion syndrome (CHS). An effective and standardized strategy for real-time, dynamic assessment of cerebral perfusion and individualized perioperative management is still lacking. This study aimed to evaluate the clinical value of transcranial Doppler (TCD) monitoring in improving perioperative safety and long-term outcomes in patients undergoing CEA.

**Methods:** Patients who underwent CEA at the Department of Vascular Surgery, the Second Xiangya Hospital of Central South University between February 2022 and December 2024 were retrospectively analyzed. According to the use of perioperative TCD monitoring, patients were divided into the TCD group and the non-TCD group. Baseline characteristics, perioperative management, complication rates, and long-term follow-up outcomes were compared between the two groups. Cerebral hemodynamic changes monitored by TCD were also analyzed.

**Results:** A total of 53 patients were included, with 25 in the TCD group and 28 in the non-TCD group. No significant differences were observed between the two groups in terms of age, sex, or major risk factors (all  $P>0.05$ ). Operative time, length of hospital stay, and intraoperative shunt use were comparable between the two groups (all  $P>0.05$ ). Within 30 days postoperatively, no transient ischemic attacks (TIA) or CHS occurred in the TCD group, whereas 2 cases of TIA and 3 cases of CHS were observed in the non-TCD group. During follow-up, no adverse events occurred in the TCD group, while 2 adverse events were recorded in the non-TCD group. Kaplan-Meier analysis demonstrated that the 3.5-year event-free survival rate was significantly higher in the TCD group than in the non-TCD group ( $P=0.047$ ).

**Conclusion:** The use of TCD monitoring during CEA is significantly associated with improved long-term event-free survival. By enabling real-time assessment of cerebral hemodynamics, TCD facilitates identification of patients at high risk for cerebral hypoperfusion and hyperperfusion and guides refined perioperative management, thereby providing substantial clinical value.

#### Key words

Carotid Stenosis; Endarterectomy, Carotid; Ultrasonography, Doppler, Transcranial; Hemodynamics

CLC number: R654.3

脑卒中是我国居民的首要死亡原因<sup>[1-3]</sup>, 其中缺血性卒中占新发病例的86.8%, 慢性颈动脉粥样硬化狭窄是缺血性脑卒中的主要病因之一<sup>[4]</sup>。颈动脉内膜切除术(carotid endarterectomy, CEA)作为治疗颈动脉狭窄的金标准, 可有效降低卒中风险<sup>[5-6]</sup>。然而, 术中需暂时阻断颈动脉, 可能导致脑灌注下降引发缺血, 术后又可能因脑高灌注综合征(cerebral hyperperfusion syndrome, CHS)增加脑出血风险。经颅多普勒超声(transcranial Doppler ultrasound, TCD)作为一种非侵入性、实时动态的血流监测技术, 能够在CEA术中评估颅内血流动力学变化, 及时识别低灌注高危患者、指导转流管使用<sup>[7]</sup>, 并监测微栓子脱落<sup>[8]</sup>及CHS发生<sup>[9-10]</sup>, 在围手术期脑保护中具有独特优势。本文回顾性

总结笔者中心CEA术中应用TCD监测的临床经验, 并探讨其对患者预后的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

回顾性分析2022年2月—2024年12月收治于中南大学湘雅二医院血管外科并接受CEA手术的患者资料, 根据围手术期是否使用TCD分为TCD组和非TCD组。本研究经中南大学湘雅二医院伦理委员会批准(批件号: 2022JJ80038), 并豁免患者知情同意, 本研究符合国家制定的涉及人的生物医学研究伦理标准和世界医学协会最新修订的《赫尔辛基宣言》的要求。

## 1.2 诊疗方法

所有患者术前接受包括冠状动脉计算机断层扫描血管成像 (computed tomography angiography, CTA), 头颈部动脉CTA等在内的全面评估, 患者均经彩色多普勒超声、CTA明确诊断, 并进行手术方案的制定, 手术指征参考2023年欧洲血管外科学会 (European Society for Vascular Surgery, ESVS) 制定的《动脉粥样硬化性颈动脉和椎动脉疾病管理的临床实践指南》<sup>[11]</sup>中的推荐: 低手术风险且狭窄率 $>70\%$ 的无症状患者;  $50\% \sim 99\%$ 狭窄的症状性颈动脉狭窄患者。手术禁忌包括全身状况较差, 不能耐受麻醉或手术; 严重心肺功能不全; 活动性感染或合并凝血功能障碍等。TCD组检测部位为患者颞弓上方、眼眶外上方与耳屏之间的颞部区域, 患者入院后在不同血压条件下测得双侧大脑中动脉 (middle cerebral artery, MCA) 血流作为基线, 并且行颈动脉压迫试验探查大脑前、后交通动脉开通情况。手术在全麻下进行, 患者取仰卧位, 肩部垫高, 将TCD探头固定于上述位置。探测深度约为45~65 mm, 监测到连续且清晰的双侧MCA血流, 使用固定架固定探头保证连续监测信号。将患者头部偏向术野对侧, 沿胸锁乳突肌前缘做纵行切口, 逐层解剖后暴露颈总动脉 (common carotid artery, CCA)、颈外动脉 (external carotid artery, ECA)、甲状腺上动脉、颈内动脉 (internal carotid artery, ICA) (图1A)。悬吊甲状腺上动脉并依次阻断CCA, ECA、ICA后, 沿CCA及ICA走行纵行切开血管, 显露斑块, 沿内膜平面仔细剥除病变内膜及斑块, 充分冲洗检查后确定无斑块残留, 使用5-0/6-0 Prolene血管缝线吻合切口, 吻合完毕后依次恢复ECA, CCA及ICA血流, 松解甲状腺上动脉, 触摸ICA吻合口以远搏动 (图1B-C)。充分止血后放置引流管, 逐层缝合皮下组织及皮肤。术中全程连续监测双侧MCA血流速度并记录数值。在阻断CCA后, 若出现脑灌注不足 (MCA平均血流速度 $<$ 基线值 $\times 50\%$ ) 则适当升高全身动脉压, 若升压后持续不改善可考虑使用转流管<sup>[12]</sup>。术中进行持续监测, 动态调整全身动脉压。松开颈动脉阻断后, 若出现脑灌注过高 (TCD测得MCA平均流速较基线增加100%), 需缓慢逐步松开阻断或降低全身动脉压降低CHS发生概率<sup>[9, 13]</sup>。围手术期重点关注TCD数值及纳入分析的时间节点包括: 入院后基线数值、麻醉前、

麻醉后 (可能伴随全身动脉压下降)、麻醉后升压、颈动脉阻断后、阻断后5 min、开放阻断即刻、开放阻断后5 min、术后第2天。

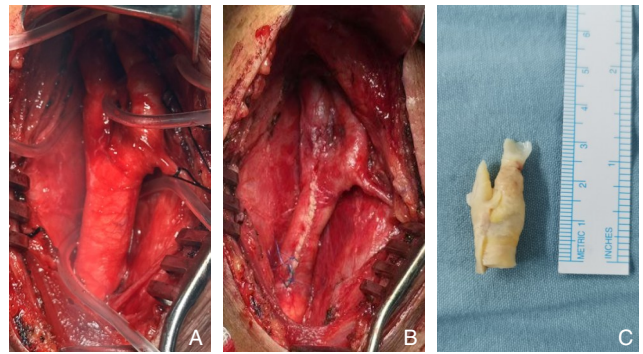


图1 CEA手术过程相关照片 A: 显露CCA、ICA及ECA; B: 斑块剥脱并完成血管吻合后血流恢复; C: 切除的动脉粥样硬化斑块标本

Figure 1 Intraoperative images of CEA A: Exposure of the CCA, ICA, and ECA; B: Restoration of blood flow after plaque removal and vascular closure; C: Excised atherosclerotic plaque specimen

## 1.3 相关指标及定义

分析两组患者的基线资料、围手术期治疗结果及远期随访情况。主要终点为术后及随访期间死亡, 患侧新发脑梗及脑出血。次要终点为对侧新发脑梗及脑出血, 伤口感染, CHS, 短暂性脑缺血发作 (transient ischemic attack, TIA)。不良事件包括所有主要终点及次要终点事件。TIA定义为突然起病的脑或视网膜的局灶性缺血症状, 持续时间短暂, 且无急性脑梗死证据。CHS定义为: (1) 严重头痛、癫痫发作、意识水平恶化和 (或) 局灶性神经症状发展; (2) 脑影像学检查未显示任何额外的缺血性病灶; 和 (或) (3) 术后患侧大脑半球脑血流量超过对侧半球, 或术后MCA血流速度增加超过术前值的100%<sup>[14]</sup>。TCD组低灌注高危患者定义为术前TCD检查提示大脑前、后交通动脉未开放, 或颈动脉阻断后MCA平均流速较基线下降幅度 $>50\%$ <sup>[12, 15]</sup>; CHS高危患者定义为颈动脉开放阻断后, TCD测得MCA平均流速较基线增加100%, 或术后恢复期间出现头晕、头痛、异常血压升高等临床表现<sup>[9, 16-18]</sup>; 微栓子信号 (microembolic signals, MES) 定义为术中操作期间TCD监测到的短暂、高强度、单向声信号<sup>[8]</sup>。

## 1.4 术后处理及随访

术后6 h视引流情况给予低分子肝素抗凝, 患

者清醒后术后第2天开始接受抗血小板治疗。所有患者术后1周或出院前接受了CTA检查,随后在出院后第6个月和12个月以及之后每年进行CTA或超声复诊,并接受电话随访。

### 1.5 统计学处理

所有数据采用SPSS 25.0统计软件进行分析。分类变量以频数和百分比[n(%)]表示,连续变量中符合正态分布的以均数±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,不符合正态分布的以中位数(四分位数间距)[M(IQR)]表示,数据正态性通过Shapiro-Wilk检验评估。两组连续变量比较:正态分布且方差齐性者采用独立样本t检验,不符合正态分布者采用Mann-Whitney U检验。分类变量比较采用 $\chi^2$ 检验或Fisher精确检验。采用Kaplan-Meier生存曲线分析不良事件发生率,组间差异通过Log-rank检验比较。双侧 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 患者基线资料

2022年2月—2024年12月本中心共55例患者接受CEA手术,其中2例失访,最终获得53例患者完整资料,其中TCD组25例,非TCD组28例。两组患者在年龄、性别、危险因素、症状类型及病变分布等基线资料方面差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$ )(表1)。

### 2.2 患者围手术期情况

TCD组与非TCD组的手术时间中位数分别为135(126~144)min和129(126~135)min;中位住院时间分别为12(12~14)d与12(12~15)d;术中使用时转流比例分别为4.0%和3.6%,以上差异均

无统计学意义(均 $P > 0.05$ )。在术后30d内并发症方面,TCD组未发生TIA,非TCD组2例(7.1%);TCD组患侧新发脑梗死1例(4.0%),非TCD组未发生脑梗死( $P = 0.285$ );CHS在TCD组0例、非TCD组3例(10.7%);两组均未发生脑出血。TCD组新发脑梗为79岁男性患者,全麻下接受右侧CEA手术,术后出现左侧偏瘫(肌力3级),查核磁共振提示右侧大脑部分梗死,经神经内科团队评估后选择药物治疗,目前偏瘫症状较前缓解(肌力4级)。两组30d内各项并发症发生率差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$ )(表2)。

表1 两组患者基线临床特征比较

Table 1 Comparison of baseline clinical characteristics between the two groups

变量	TCD组 (n=25)	非TCD组 (n=28)	$t/\chi^2$	P
年龄[岁,M(IQR)]	66(62~68)	67(65~68)	290.5	0.288
性别[n(%)]				
男	20(80.0)	22(78.6)	0.016	0.898
女	5(20.0)	6(21.4)		
吸烟史[n(%)]	16(64.0)	18(64.3)	0.000	0.983
合并症[n(%)]				
高血压	18(72.0)	22(78.6)	0.308	0.579
糖尿病	8(32.0)	8(28.6)	0.074	0.786
冠心病	6(24.0)	9(32.1)	0.432	0.511
高血脂	15(60.0)	19(67.9)	0.355	0.552
卒中史	7(28.0)	9(32.1)	0.108	0.743
外周动脉硬化	15(60.0)	18(64.3)	0.103	0.748
类型[n(%)]				
症状型	18(72.0)	20(71.4)	0.002	0.963
无症状型	7(28.0)	8(28.6)	0.002	0.963
病变位置[n(%)]				
左侧	11(44.0)	12(42.9)	0.007	0.933
右侧	14(56.0)	16(57.1)	0.007	0.933

表2 两组患者围手术期结果及30d内并发症

Table 2 Perioperative outcomes and 30-d complications in the two groups

变量	TCD组(n=25)	非TCD组(n=28)	$Z/\chi^2$	P
手术时间[min,M(IQR)]	135(126~144)	129(126~135)	415.0	0.249
住院时间[d,M(IQR)]	12(12~14)	12(12~15)	292.0	0.297
使用时转流[n(%)]	1(4.0)	1(3.6)	0.007	0.935
TIA[n(%)]	0(0.0)	2(7.1)	1.856	0.173
患侧新发脑梗[n(%)]	1(4.0)	0(0.0)	1.142	0.285
CHS[n(%)]	0(0.0)	3(10.7)	2.839	0.092

### 2.3 TCD组患者术中监测情况

TCD组颈动脉阻断前平均动脉压和患侧

MCA平均血流速度分别为( $99 \pm 10$ )mmHg( $1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$ )和( $43 \pm 8.5$ )cm/s,颈动脉阻

断 5 min 后平均动脉压和患侧 MCA 平均血流速度 ( $93 \pm 8$ ) mmHg 和 ( $29 \pm 7.6$ ) cm/s。图 2 显示了 TCD 组患者在不同时间点平均动脉压和患侧 MCA 平均血流速度的变化情况。TCD 组围手术期识别到低灌注高危患者 4 例，其中 1 例术前 TCD 检查提示前、后交通动脉未开放，术中采用转流管辅助手术 (图 3)；另 3 例为颈动脉阻断后 MCA 平均流速较基线下降幅度  $>50\%$ ，通过升高全身动脉压后血流速度改善，未使用转流管 (图 4)。识别 CHS

高危患者 4 例，其中 3 例于开放阻断后 MCA 平均流速较基线上升幅度  $>100\%$ ，通过降低全身动脉压并逐级释放阻断缓解；1 例患者术后恢复期出现头晕、头痛，TCD 检查提示 MCA 平均流速较基线上升幅度  $>100\%$ ，予降压治疗后症状缓解，MRI 检查未见脑出血迹象。术中监测到 1 例 MES 信号，患者术后未出现明显神经系统后遗症，未予特殊处理。

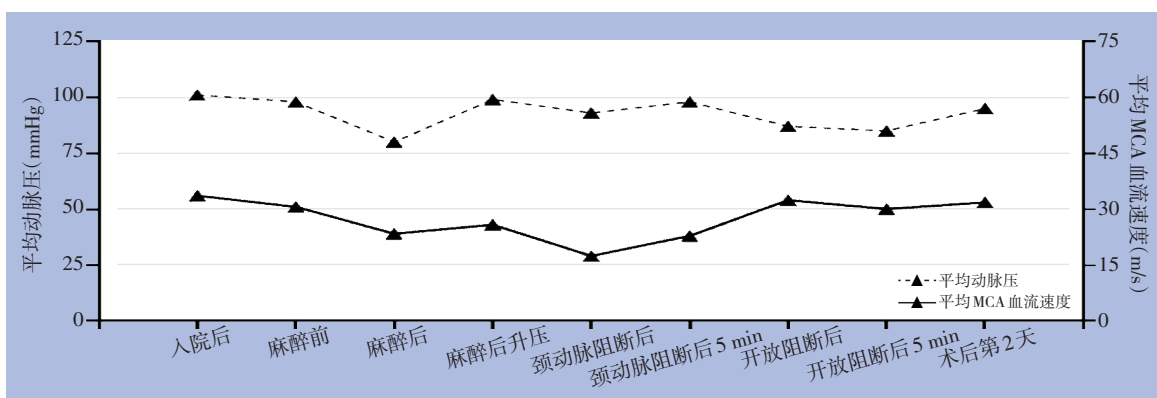


图 2 不同时间点平均动脉压和患侧 MCA 平均血流速度变化情况

Figure 2 Changes in mean arterial pressure and mean blood flow velocity of the affected middle cerebral artery at different time points

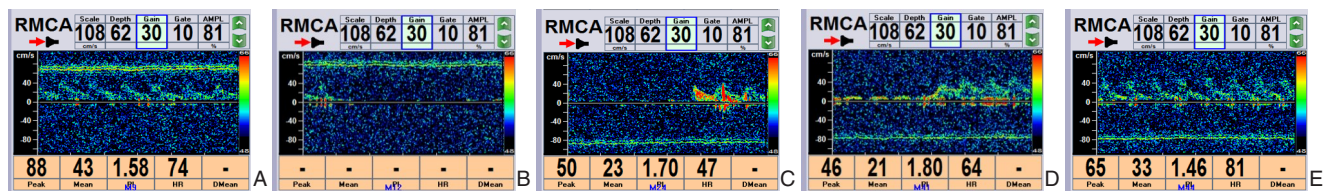


图 3 术中 TCD 监测过程 A: 麻醉后右侧 MCA 平均血流速度; B: 颈动脉阻断后血流速度变化; C: 转流管使用期间血流情况; D: 开放阻断即刻血流情况; E: 开放阻断后 5 min 血流变化

Figure 3 Intraoperative TCD monitoring A: Mean flow velocity of the right MCA after anesthesia; B: Flow velocity after carotid clamping; C: Flow velocity during shunt placement; D: Immediately after clamp release; E: Five minutes after reperfusion

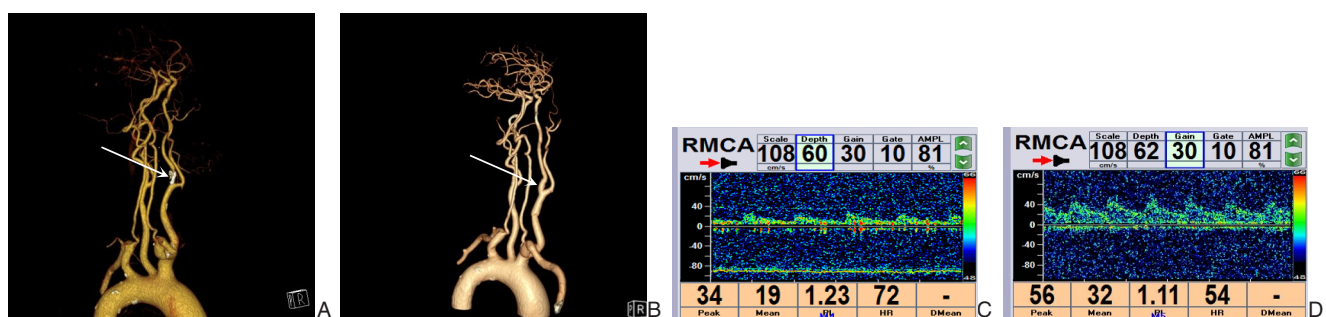


图 4 影像资料与术中 MCA 血流变化 A: 术前影像显示右侧 ICA 重度狭窄; B: 术后影像显示颈动脉通畅; C: 阻断后 MCA 血流速度变化; D: 升高血压后血流改善

Figure 4 Imaging findings and intraoperative MCA hemodynamic changes A: Preoperative imaging showing severe right ICA stenosis; B: Postoperative imaging confirming a patent carotid lumen; C: Changes in MCA flow velocity before and after carotid clamping; D: Improvement in MCA flow velocity after systemic blood pressure elevation

## 2.4 随访情况

所有患者均通过电话或门诊方式完成随访。TCD组与非TCD组的平均随访时间分别为(24.5±6.5)个月与(25.6±1.9)个月,差异无统计学意义( $P=0.125$ )。随访期间,TCD组未见再发并发症;非TCD组中1例患者于术后6个月发生对侧脑梗死,另1例患者于术后10个月出现TIA,均未遗留明显神经功能缺损。Kaplan-Meier生存曲线分析结果显示,TCD组在3.5年随访期间发生不良事件的风险明显低于非TCD组( $P=0.047$ )(图5)。

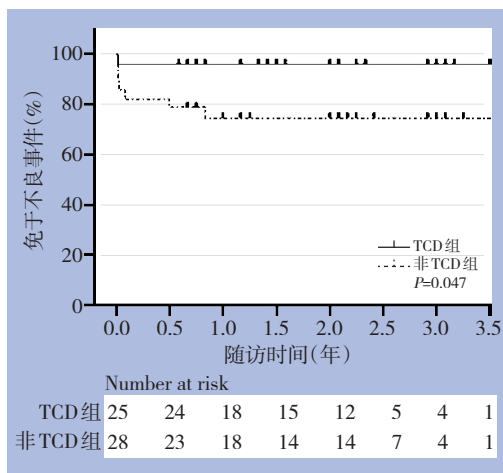


图5 TCD组与非TCD组3.5年免于不良事件的Kaplan-Meier曲线

Figure 5 Kaplan-Meier curves for freedom from adverse events at 3.5 years in the TCD and non-TCD groups

## 3 讨论

目前针对颈动脉狭窄的手术治疗,主要有颈动脉支架植入术(carotid artery stenting, CAS)及CEA<sup>[19-20]</sup>,研究表明CAS的30d卒中和死亡风险高于CEA<sup>[21-23]</sup>,且术后发生再狭窄的概率更高<sup>[24]</sup>。经颈动脉血管重建术作为一种结合手术与血管内技术的微创方法,显示出较低的卒中发生风险,1年内同侧卒中发生率为0.6%,尤其适合高风险患者<sup>[25]</sup>。尽管如此,CEA因其长期疗效确切、并发症发生率较低,仍被认为是治疗颈动脉狭窄的主要手段<sup>[11]</sup>,但其仍可能出现围手术期脑梗死、脑出血及神经损伤等并发症<sup>[26-27]</sup>。

近年来,CEA手术逐渐应用以下监测技术来降低围手术期并发症发生率。例如以脑电图(electroencephalography, EEG)为代表的电生理监

测,通过头皮电极记录大脑皮层电活动,可敏感反映皮层缺血并指导转流,但对皮层下缺血识别有限,特异度较低,近期卒中史患者敏感度下降<sup>[28]</sup>。血氧监测可通过测定皮层下微血管氧合血红蛋白比例,间接反映术中脑血流,但易受颅外组织代谢、血压及动脉氧饱和度影响,可靠性仍需验证<sup>[29-30]</sup>。残端压(stump pressure, SP)是指当CCA及ECA阻断后测得的ICA压力,然而,SP测量无法实现动态监测,且用于指导转流的阈值缺乏统一标准,导致其敏感度和特异度均受限制。研究证实,单纯基于SP测量值进行选择转流的患者术后卒中发生率更高,且并未显著改善TIA发作、死亡或缺血性卒中的发生率<sup>[31]</sup>。与上述方法相比,TCD的优势包括能连续、实时、非侵入性地监测MCA血流速度与方向变化,反应大脑灌注情况;能识别MES,在监测栓塞风险方面具有独特价值;能在术前评估颅内动脉侧支循环(如前、后交通动脉的开通情况)及MCA血流速度基线资料。

此外,TCD在术中识别低灌注高危人群,并且指导转流管使用方面具有重要的临床价值。CEA手术中需对患侧颈动脉进行阻断,此时颅内组织血供完全依赖于侧支循环以及Willis环代偿供血,有一定缺血性卒中发生的概率。此时提高全身动脉压以及必要时使用转流管能够有效改善颅内供血。但是使用转流管会增加手术时间,并且合并血栓或斑块脱落导致缺血性卒中的发生。TCD可用于在颈动脉阻断后监测患侧MCA血流速度的下降幅度,而这一变化已被证实与同侧脑血流量(cerebral blood flow, CBF)的变化密切相关<sup>[32]</sup>,因此对是否使用转流管提供了重要参考。但是目前使用TCD作为指导转流的阈值并不统一,一般为TCD血流速度下降幅度超过30%或50%以上,或者联合使用EEG、SP等作为判断是否使用转流的依据,总体使用转流的比例在10.6%~30%之间,但其最佳阈值仍需进一步研究<sup>[12, 33-35]</sup>。2023年ESVS《动脉粥样硬化性颈动脉与椎动脉疾病管理临床实践指南》<sup>[11]</sup>已经明确推荐常规不转流情况下行CEA是安全有效的,而是否使用转流应由手术医生根据自身判断酌情决定(推荐等级IIa,证据等级C)。在本研究中,术中颈动脉阻断后,有4例患者的MCA血流速度较基线下降超过50%。除前、后交通动脉未开放的1例患者使用转流管外,

其余3例均在提高全身动脉压的基础上完成手术治疗,围手术期均未发生并发症。根据本中心经验,并不将放置转流作为首要选择,通过TCD实时监测,及时升高血压可有效提高MCA平均流速,有效避免低灌注发生,减少转流管使用率(本研究中仅3.8%),从而降低相关风险。

研究证实CEA术后发生CHS的概率为0~3%,主要表现为头痛、高血压、癫痫发作及局灶性神经功能缺损,严重者可进展为脑水肿或脑出血<sup>[16]</sup>。CHS最常见于术后CBF较基线值增加超过100%的患者,在Fukuda等<sup>[36-38]</sup>的研究中,CBF增加超过100%的患者,约有16.7%~28.6%发生CHS,而在CBF升高不足100%的患者中则很少见。CBF的数据一般可通过单光子发射计算机断层扫描(single-photon emission computed tomography, SPECT)来获得,但是其显然需要时间和金钱成本。研究证实由TCD测得的MCA平均血流速度与CBF变化显著相关,且具有成本低、易于实施的优点。目前TCD监测MCA血流速度的变化被认为是预测CHS的金标准<sup>[9, 18]</sup>,且多数研究认为TCD测得术侧MCA平均血流速度较基线增加100%及以上可有效识别CEA术后CHS高风险患者。在Fassaert等<sup>[18]</sup>的研究中,257例CEA患者中有9例(3.5%)发生CHS,术中、术后2h及术后24h的TCD测量在预测CHS中的阳性预测值分别为8%、11%和18%,阴性预测值则分别为97%、98%和99%,研究表明,在CEA术后24h使用TCD测定MCA血流速度,是最准确的识别无脑过度灌注风险患者的方法。脑出血是CHS最为严重的并发症。已有研究证实,CEA术后脑出血的高发时段为术后第3~5天<sup>[39-40]</sup>,所以在术后患者管理中仍可发挥TCD实时性和高敏感度的特点,当患者出现头晕、头痛等神经症状时,可及时进行TCD检查鉴别CHS高危患者,从而进行针对性降压或药物治疗<sup>[41]</sup>。

颈动脉狭窄患者多存在脑血管调节功能障碍,再加上CEA术中需要麻醉、临时阻断等,血压的轻微波动即可影响到脑血流,故能否有效调节血压对手术成功有着重要作用。在本研究中,TCD组麻醉后平均动脉压从基线99 mmHg降至93 mmHg,伴随MCA血流速度下降,除1例使用转流管外,其余患者通过动态调整血压,成功维持了脑灌注稳定。而在手术完成颈动脉开放阻断后,TCD组识别CHS高危患者4例,其中3例于开放阻断后

MCA平均血流速度较基线上升幅度>100%,通过降低全身动脉压并逐级释放阻断缓解,避免了CHS发生。1例患者术后恢复期出现头晕、头痛,TCD检查提示MCA平均血流速度较基线上升幅度>100%,予降压治疗后症状缓解,磁共振成像检查未见脑出血迹象。该结果显示,非TCD组CHS发生率为10.7%(3/28),而TCD组为0( $P=0.092$ ),证实TCD通过实时监测MCA血流速度变化,可有效鉴别CHS高危患者,并通过及时降压或逐步释放阻断预防CHS发生,充分体现了TCD能够提供实时血流信息,在术中指导血压精细调控方面有着重要作用。

此外,TCD还可实时监测MES,既往研究已证实,MES是CEA术后神经系统并发症及新发脑损伤的危险因素<sup>[42]</sup>。Ackerstaff等<sup>[8]</sup>在一项涵盖双中心、纳入1 058例接受CEA患者的研究中发现,共有31例患者发生缺血性卒中,8例发生出血性卒中。分析结果显示,手术中颈动脉分离及缝合阶段出现的微栓塞与围手术期卒中风险显著相关。所以术者在高危操作阶段可利用TCD密切监测MES,并及时优化手术策略,以减少微栓子脱落,从而有效降低围手术期卒中的发生率。在本研究中,TCD监测到1例MES,发生于术中操作期间,为短暂、高强度、单向声信号,提示微栓子掉落。患者术后未出现明显神经系统后遗症,未予特殊处理。该结果表明,TCD对MES的实时监测有助于早期识别风险,尽管本组发生率较低(4.0%),但强调了其在减少卒中发生方面的潜在作用。

在本研究中,非TCD组围手术期主要不良事件以CHS和TIA为主,其发生率分别为10.7%(3/28)和7.1%(2/28),而TCD组则均为0,提示TCD监测可显著降低围手术期并发症风险。尽管两组间差异未达统计学意义( $P=0.092$ 和 $P=0.173$ ),但这可能归因于样本量较小导致的统计效能不足,以及CEA本身并发症发生率较低的原因。然而上述结果仍具有重要的临床意义,并且TCD组患者在随访期间表现出更优的远期无不良事件生存率。这些结果提示,术中使用TCD实时脑血流动力学监测不仅在围手术期发挥保护作用,更可能通过一系列机制带来长期的神经保护效应。其潜在机制可能包括:(1)TCD监测可在术中动态评估大脑血流速度变化,及时识别低灌注状态,使术者能够迅速判断是否采用转流,以及适时提高全身动

脉压从而减少脑缺血损伤的发生; (2) TCD 监测能实时检测 MES 信号, 使术者及时调整操作, 或者冲洗管腔减少术中栓塞事件发生, 从而降低术后缺血性脑卒中的风险; (3) TCD 在松开阻断后以及术后早期可协助评估高灌注状态, 结合患者临床症状, 有助于及时识别并预防 CHS 的发生, 对高危人群及时进行干预, 避免 CHS 引起继发性损伤。上述因素共同作用, 使得 TCD 患者获得更好的临床预后。

本研究 TCD 组中有 1 例患者术后出现新发脑梗死, 但术中 TCD 监测未发现明显低灌注风险及 MES。该结果提示不能完全依赖 TCD 监测手段进行风险判断。一方面, TCD 监测有假阴性可能; 另一方面斑块脱落, 迟发性血栓形成可能在监测之外的时间。此外 TCD 在 CEA 中的应用同样存在一定技术局限性: (1) 对操作者技术依赖性强, 需要准确定位 MCA 位置; (2) 当 MCA 血流速度低于 15 cm/s 时, 难以获得精确的数值<sup>[43]</sup>; (3) 10%~15% 的患者因为颞骨声窗质量较差导致监测失败。这提示在术前筛选人群应该术前常规行 TCD 探查, 确认双侧 MCA 信号清晰; 评估 MCA 基线血流速度, 排除流速过低患者以避免术中低速状态下的血流信号丢失; 临床实践中需重视操作者的学习曲线和技术培训, 以提升 TCD 监测的成功率与可靠性。在经济性方面, TCD 设备投资相对较低、维护和操作成本较小、无需高值一次性耗材, 便于在临床中推广<sup>[44]</sup>。当 TCD 监测因声窗限制或技术问题而失败时, 可及时结合使用其他监测手段辅助操作, 指导转流等。

本研究的局限性主要包括以下几个方面: 本研究为单中心、回顾性研究, 样本量相对有限(每组<30例), 可能导致统计效能不足; 其次分组依据虽按随机分配原则进行, 但回顾性设计本身易引入选择偏倚, 可能影响两组基线可比性和结果的推断; TCD 监测本身存在 10%~15% 的颞窗失败率, 本研究未报告监测失败病例, 可能低估技术局限性。未来需开展多中心、前瞻性随机对照试验, 增大样本量并严格控制混杂变量, 以进一步验证 TCD 监测在 CEA 中的长期获益。

综上所述, CEA 总体安全, CEA 术中应用 TCD 监测与患者更优的远期无不良事件生存率显著相关, 提示 TCD 在识别高危患者和指导围手术期管理方面具有重要临床价值。

作者贡献声明: 张雄、何昊负责数据统计分析、随访、文章撰写; 邱剑、黎明负责随访、影像学测量; 李全明、舒畅、何昊负责论文审核、技术支持。

利益冲突: 所有作者均声明不存在利益冲突。

## 参考文献

- [1] Wang L, Zhou B, Zhao Z, et al. Body-mass index and obesity in urban and rural China: findings from consecutive nationally representative surveys during 2004–18[J]. *Lancet*, 2021, 398(10294):53–63. doi:10.1016/S0140-6736(21)00798-4.
- [2] Wang L, Peng W, Zhao Z, et al. Prevalence and treatment of diabetes in China, 2013–2018[J]. *JAMA*, 2021, 326(24): 2498–2506. doi:10.1001/jama.2021.22208.
- [3] Wang YJ, Li ZX, Gu HQ, et al. China stroke statistics 2019: a report from the national center for healthcare quality management in neurological diseases, China national clinical research center for neurological diseases, the Chinese stroke association, national center for chronic and non-communicable disease control and prevention, Chinese center for disease control and prevention and institute for global neuroscience and stroke collaborations[J]. *Stroke Vasc Neurol*, 2020, 5(3):211–239. doi: 10.1136/svn-2020-000457.
- [4] Tu WJ, Zhao ZP, Yin P, et al. Estimated burden of stroke in China in 2020[J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6(3): e231455. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2023.1455.
- [5] Bonati LH, Kakkos S, Berkefeld J, et al. European Stroke Organisation guideline on endarterectomy and stenting for carotid artery stenosis[J]. *Eur Stroke J*, 2021, 6(2):1–XLVII. doi:10.1177/23969873211012121.
- [6] Chu G, Cheng L, Zhang K. Carotid artery stenting versus carotid endarterectomy for carotid artery stenosis: systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2025, 106(5): 2913–2934. doi: 10.1002/ccd.70133.
- [7] Ghali R, Palazzo EG, Rodriguez DI, et al. Transcranial Doppler intraoperative monitoring during carotid endarterectomy: experience with regional or general anesthesia, with and without shunting[J]. *Ann Vasc Surg*, 1997, 11(1): 9–13. doi: 10.1007/s100169900003.
- [8] Ackerstaff RG, Moons KG, van de Vlasakker CJ, et al. Association of intraoperative transcranial Doppler monitoring variables with stroke from carotid endarterectomy[J]. *Stroke*, 2000, 31(8): 1817–1823. doi:10.1161/01.str.31.8.1817.
- [9] Pennkamp CA, Tromp SC, Ackerstaff RA, et al. Prediction of

- cerebral hyperperfusion after carotid endarterectomy with transcranial Doppler[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2012, 43(4): 371-376. doi:10.1016/j.ejvs.2011.12.024.
- [10] Pennekamp CA, Moll FL, De Borst GJ. Role of transcranial Doppler in cerebral hyperperfusion syndrome[J]. *J Cardiovasc Surg (Torino)*, 2012, 53(6):765-771.
- [11] Naylor R, Rantner B, Ancetti S, et al. Editor's choice - European society for vascular surgery (ESVS) 2023 clinical practice guidelines on the management of atherosclerotic carotid and vertebral artery disease[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2023, 65(1): 7-111. doi:10.1016/j.ejvs.2022.04.011.
- [12] Yun WS. Cerebral monitoring during carotid endarterectomy by transcranial Doppler ultrasonography[J]. *Ann Surg Treat Res*, 2017, 92(2):105-109. doi:10.4174/astr.2017.92.2.105.
- [13] 国家卫生健康委脑卒中防治工程专家委员会血管超声专业委员会, 国家卫生健康委能力建设和继续教育超声医学专家委员会血管学组, 中华超声医学培训工程脑颈及外周血管超声专家委员会. 脑血管超声检测若干问题中国专家共识[J]. *中国脑血管病杂志*, 2024, 21(11): 782-792. doi: 10.3969/j. issn. 1672-5921.2024.11.009.
- Professional Committee of Vascular Utrasound of Stroke Prevention and Treatment Project Expert Committee of National Health Commission, Vascular Group of Capacity Building and Continuing Education Ultrasound Medical Expert Committee of National Health Commission, Expert Committee of Cerebral and Peripheral Vascular Ultrasound of Chinese Ultrasound Medical Training Program. Expert consensus of China on several issues of cerebrovascular ultrasound detection[J]. *Chinese Journal of Cerebrovascular Diseases*, 2024, 21(11): 782-792. doi: 10.3969/j. issn.1672-5921.2024.11.009.
- [14] 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, 381: 74-82. doi: 10.1016/j.jns.2017.08.020.
- [15] 李燕, 刘玉梅, 杨华, 等. 单侧颈内动脉重度狭窄或闭塞患者颅内侧支循环的超声检测[J]. *中国脑血管病杂志*, 2006, 3(6):254-256. doi:10.3969/j.issn.1672-5921.2006.06.005.
- Li Y, Liu YM, Yang H, et al. Ultrasonographic examination in patients with severe unilateral internal carotid arterial stenosis or occlusion[J]. *Chinese Journal of Cerebrovascular Diseases*, 2006, 3(6):254-256. doi:10.3969/j.issn.1672-5921.2006.06.005.
- [16] van Mook WNKA, Rennenberg RJMW, Schurink GW, et al. Cerebral hyperperfusion syndrome[J]. *Lancet Neurol*, 2005, 4(12): 877-888. doi:10.1016/S1474-4422(05)70251-9.
- [17] Fujimoto S, Toyoda K, Inoue T, et al. Diagnostic impact of transcranial color-coded real-time sonography with echo contrast agents for hyperperfusion syndrome after carotid endarterectomy[J]. *Stroke*, 2004, 35(8):1852-1856. doi:10.1161/01.STR.0000133131.93900.ff.
- [18] Fassaert LMM, Immink RV, van Vriesland DJ, et al. Transcranial Doppler 24 hours after carotid endarterectomy accurately identifies patients not at risk of cerebral hyperperfusion syndrome[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2019, 58(3): 320-327. doi: 10.1016/j.ejvs.2019.04.033.
- [19] 刘鹏, 樊雪强, 叶志东. 颈动脉内膜切除术和支架植入术的合理选择[J]. *中国普通外科杂志*, 2014, 23(6):715-718. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2014.06.001.
- Liu P, Fan XQ, Ye ZD. Rational choice of carotid endarterectomy and carotid artery stenting[J]. *China Journal of General Surgery*, 2014, 23(6):715-718. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2014.06.001.
- [20] 原野, 郭大乔, 符伟国, 等. 颈动脉内膜剥脱与支架置入术患者围手术期脑灌注对比分析[J]. *中国普通外科杂志*, 2015, 24(12): 1727-1731. doi:10.3978/j.issn.1005-6947.2015.12.017.
- Yuan Y, Guo DQ, Fu WG, et al. Carotid endarterectomy versus carotid artery stenting on cerebral perfusion in patients with carotid stenosis[J]. *China Journal of General Surgery*, 2015, 24(12):1727-1731. doi:10.3978/j.issn.1005-6947.2015.12.017.
- [21] Rosenfield K, Matsumura JS, Chaturvedi S, et al. Randomized trial of stent versus surgery for asymptomatic carotid stenosis[J]. *N Engl J Med*, 2016, 374(11):1011-1020. doi:10.1056/NEJMoa1515706.
- [22] Eckstein HH, Reiff T, Ringleb P, et al. SPACE-2: a missed opportunity to compare carotid endarterectomy, carotid stenting, and best medical treatment in patients with asymptomatic carotid stenoses[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2016, 51(6): 761-765. doi: 10.1016/j.ejvs.2016.02.005.
- [23] Silver FL, MacKey A, Clark WM, et al. Safety of stenting and endarterectomy by symptomatic status in the Carotid Revascularization Endarterectomy Versus Stenting Trial (CREST) [J]. *Stroke*, 2011, 42(3): 675-680. doi: 10.1161/STROKEAHA.110.610212.
- [24] Arquizan C, Trinquart L, Touboul PJ, et al. Restenosis is more frequent after carotid stenting than after endarterectomy: the EVA-3S study[J]. *Stroke*, 2011, 42(4): 1015-1020. doi: 10.1161/STROKEAHA.110.589309.
- [25] Malas MB, Leal Lorenzo JI, Nejm B, et al. Analysis of the ROADSTER pivotal and extended-access cohorts shows excellent 1-year durability of transcarotid stenting with dynamic flow reversal[J]. *J Vasc Surg*, 2019, 69(6): 1786-1796. doi: 10.1016/j.jvs.2018.08.179.
- [26] 孙岩, 张十一, 刘洋, 等. 颅外段颈动脉狭窄的手术治疗[J]. *中国普通外科杂志*, 2011, 20(12):1383-1385. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2011.12.025.

- Sun Y, Zhang SY, Liu Y, et al. Surgical treatment of extracranial carotid artery stenosis[J]. *China Journal of General Surgery*, 2011, 20(12):1383-1385. doi:10.7659/j.issn.1005-6947.2011.12.025.
- [27] Halliday A, Harrison M, Hayter E, et al. 10-year stroke prevention after successful carotid endarterectomy for asymptomatic stenosis (ACST-1): a multicentre randomised trial[J]. *Lancet*, 2010, 376(9746):1074-1084. doi:10.1016/S0140-6736(10)61197-X.
- [28] Bozzani A, Arici V, Ticozzelli G, et al. Intraoperative cerebral monitoring during carotid surgery: a narrative review[J]. *Ann Vasc Surg*, 2022, 78:36-44. doi:10.1016/j.avsg.2021.06.044.
- [29] Khan JM, McInnis CL, Ross-White A, et al. Overview and diagnostic accuracy of near infrared spectroscopy in carotid endarterectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2021, 62(5): 695-704. doi: 10.1016/j.ejvs.2021.08.022.
- [30] Wang Y, Li L, Wang TL, et al. The efficacy of near-infrared spectroscopy monitoring in carotid endarterectomy: a prospective, single-center, observational study[J]. *Cell Transplant*, 2019, 28(2): 170-175. doi:10.1177/0963689718817760.
- [31] Kordzadeh A, Abbassi OA, Prionidis I, et al. The role of carotid stump pressure in carotid endarterectomy: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ann Vasc Dis*, 2020, 13(1):28-37. doi: 10.3400/avd.ra.19-00100.
- [32] Yonan KA, Greene ER, Sharrar JM, et al. Middle cerebral artery blood flows by combining TCD velocities and MRA diameters: in vitro and in vivo validations[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2014, 40(11): 2692-2699. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2014.05.022.
- [33] Cho JW, Jang JS. Near-infrared spectroscopy versus transcranial Doppler-based monitoring in carotid endarterectomy[J]. *Korean J Thorac Cardiovasc Surg*, 2017, 50(6): 448-452. doi: 10.5090/kjtc.2017.50.6.448.
- [34] Kolkert JLP, Groenwold RHH, Leijdekkers VJ, et al. Cost-effectiveness of two decision strategies for shunt use during carotid endarterectomy[J]. *World J Surg*, 2017, 41(11): 2959-2967. doi: 10.1007/s00268-017-4085-5.
- [35] Leopardi M, Musilli A, Piccolo E, et al. Multimodal neurophysiological monitoring reduces shunt incidence during carotid endarterectomy[J]. *Ann Vasc Surg*, 2019, 61:178-184. doi: 10.1016/j.avsg.2019.04.017.
- [36] Fukuda T, Ogasawara K, Kobayashi M, et al. Prediction of cerebral hyperperfusion after carotid endarterectomy using cerebral blood volume measured by perfusion-weighted MR imaging compared with single-photon emission CT[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2007, 28(4):737-742.
- [37] Ogasawara K, Inoue T, Kobayashi M, et al. Cerebral hyperperfusion following carotid endarterectomy: diagnostic utility of intraoperative transcranial Doppler ultrasonography compared with single-photon emission computed tomography study[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2005, 26(2):252-257.
- [38] Suga Y, Ogasawara K, Saito H, et al. Preoperative cerebral hemodynamic impairment and reactive oxygen species produced during carotid endarterectomy correlate with development of postoperative cerebral hyperperfusion[J]. *Stroke*, 2007, 38(10): 2712-2717. doi:10.1161/STROKEAHA.107.483495.
- [39] Abou-Chebl A, Yadav JS, Reginelli JP, et al. Intracranial hemorrhage and hyperperfusion syndrome following carotid artery stenting: risk factors, prevention, and treatment[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2004, 43(9):1596-1601. doi:10.1016/j.jacc.2003.12.039.
- [40] Ouriel K, Shortell CK, Illig KA, et al. Intracerebral hemorrhage after carotid endarterectomy: incidence, contribution to neurologic morbidity, and predictive factors[J]. *J Vasc Surg*, 1999, 29(1):82-87. doi:10.1016/s0741-5214(99)70362-9.
- [41] Moulakakis KG, Mylonas SN, Sfyroeras GS, et al. Hyperperfusion syndrome after carotid revascularization[J]. *J Vasc Surg*, 2009, 49(4):1060-1068. doi:10.1016/j.jvs.2008.11.026.
- [42] Gaunt ME, Martin PJ, Smith JL, et al. Clinical relevance of intraoperative embolization detected by transcranial Doppler ultrasonography during carotid endarterectomy: a prospective study of 100 patients[J]. *Br J Surg*, 1994, 81(10):1435-1439. doi:10.1002/bjs.1800811009.
- [43] Dunne VG, Besser M, Ma WJ. Transcranial Doppler in carotid endarterectomy[J]. *J Clin Neurosci*, 2001, 8(2): 140-145. doi: 10.1054/jocn.2000.0752.
- [44] Hayes PD, Lloyd AJ, Lennard N, et al. Transcranial Doppler-directed dextran-40 therapy is a cost-effective method of preventing carotid thrombosis after carotid endarterectomy[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2000, 19(1):56-61. doi:10.1053/ejvs.1999.0948.

( 本文编辑 熊杨 )

本文引用格式:张雄,邱剑,黎明,等.经颅多普勒超声监测在颈动脉内膜切除术中的应用价值:单中心回顾性研究[J].中国普通外科杂志, 2025, 34(12):2586-2595. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250587  
Cite this article as: Zhang X, Qiu J, Li M, et al. Clinical value of transcranial Doppler monitoring in carotid endarterectomy: a single-center retrospective study[J]. *Chin J Gen Surg*, 2025, 34(12): 2586-2595. doi: 10.7659/j.issn.1005-6947.250587