

脑 - 硬脑膜 - 颞浅动脉血管融通术治疗烟雾病和颅内动脉粥样硬化性疾病的研究进展*

连婧阁 综述 傅瑜^① 韩鸿宾** 审校

(北京大学医学部医学技术研究院, 北京 100191)

文献标识: A 文章编号: 1009 - 6604 (2024) 07 - 0515 - 06

doi: 10. 3969/j. issn. 1009 - 6604. 2024. 07. 010

脑 - 硬脑膜 - 颞浅动脉血管融通术 (encephaloduroarteriosynangiosis, EDAS) 是一种间接血运重建技术, 1979 年由日本学者松岛善治先生发明^[1], 目前已广泛应用于烟雾病 (moyamoya disease, MMD) 治疗, 尤其是儿童 MMD。EDAS 是将颞浅动脉与其周围的筋膜分离出来后, 将其缝合在硬脑膜与脑表面贴敷, 最终实现颈外 - 颈内动脉血运重建。与直接血管重建术相比, EDAS 具有多种优势: ①手术难度较低; ②术中无需暂时阻断颅内血管; ③手术并发症少; ④仅在大脑需要时才逐渐进行血运重建, 从而降低过度灌注带来水肿和出血的风险^[2,3]。本文对 EDAS 的治疗机制、现状及评价方法进行文献总结, 旨在为临床提供参考。

1 EDAS 的治疗机制

目前, 关于 EDAS 治疗的潜在机制主要集中在血运重建^[4,5]。术后血运重建的关键因素是颈外动脉系统的供血动脉与颅内的皮层血管之间形成沟通的桥动脉, 供血动脉通过新生的桥动脉与皮层血管联通, 从而向颅内代偿供血, 在这个过程中, 与血管新生相关的内皮细胞及细胞因子发挥重要作用。Gonzalez 等^[6]报道颅内动脉粥样硬化性疾病 (intracranial atherosclerotic disease, ICAD) 患者在 EDAS 术后 1 ~ 2 个月血运重建已形成。Wang 等^[4]报道 EDAS 治疗 116 例 MMD, 术后侧支循环良好组

内皮祖细胞 (endothelial progenitor cells, EPCs) 的数量明显高于侧支循环不良组 [(0.085 ± 0.054) % vs. (0.048 ± 0.034) % , $P < 0.05$], 认为 EDAS 血管重建手术效果与患者体内 EPCs 的数量及功能水平有关, EPCs 参与 EDAS 术后血管重建的过程, MMD 患者体内 EPCs 的数量越多, EDAS 术后血管重建效果越好。另一项 EDAS 治疗 MMD 的前瞻性研究^[5]使用 CD34^{bri} CD133⁺ CD45^{dim} KDR⁺ 细胞作为 EPCs 研究其分子机制, 松岛分级良好组 EDAS 术后患者 EPCs 细胞计数明显高于术前 (0.13 ± 0.09 vs. 0.07 ± 0.05, $P < 0.05$)。这些研究均表明 EDAS 术后侧支血管的形成主要由血管生成驱动, EPCs 计数可能是促进侧支循环的最关键因素。他汀类药物可以促进卒中和脑梗伤模型中的血管生成, 影响 EPCs 的动员、增殖、趋化性和凋亡^[7]。Wang 等^[28]采用前瞻性研究对阿托伐他汀在 EDAS 诱导 MMD 患者侧支循环形成中的作用进行探索, 结果显示阿托伐他汀与 EDAS 术后良好的侧支循环显著相关 ($P = 0.041$), 认为每日 20 mg 阿托伐他汀对于 EDAS 诱导术后侧支循环的形成是安全有效的。其他研究也显示类似的结果^[9], 为 EDAS 间接血运重建后的药物辅助治疗提供新思路。

上述关于 EDAS 术后血运重建的研究均为术后 2 个月后的结果, 临床研究显示部分脑缺血患者在该手术后血管重建未完成期即取得极大效果, 提示

* 基金项目: 国家自然科学基金天元项目 (12126601); 国家自然科学基金重大项目 (62394310, 62394313, 62394314)

** 通讯作者, E-mail: hanhongbin@bjmu.edu.cn

① (北京大学第三医院神经内科, 北京 100191)

该手术方法改善脑功能可能存在除血管因素外的其他未知机制。近年来,关于脑细胞外间隙(extracellular space, ECS)的最新研究为 EDAS 预防脑卒中的潜在机制提供新方向。脑 ECS 不仅为神经网络提供基本工作条件,其内脑组织间液(interstitial fluid, ISF)引流也在细胞间的化学信息传递、神经细胞电活动、细胞营养供应与代谢废物清除中起至关重要的作用^[10,11]。光生物治疗的研究结果显示光照可打碎阻塞在 ECS 内的 A β 蛋白,加速皮质中 ISF 引流从而改善阿尔兹海默症小鼠的认知障碍^[12]。此外,Cai 等^[13]应用硬膜外动脉贴敷术(epidural arterial implantation, EAI)模拟 EDAS,将其应用于大鼠,与对照组相比,EAI 可以加快 ECS 内 ISF 引流[(68.10 \pm 4.75) min vs. (77.57 \pm 5.38) min, $P < 0.05$]。此外,周洁等^[14]研究结果也显示 EAI 可以加速丘脑区 ISF 引流。因此,这也为理解 EDAS 预防脑卒中发生的潜在机制提供全新的视角。

2 EDAS 应用现状

EDAS 是治疗 MMD 最常见的间接血管重建术,近年来也应用于 ICAD 的患者,以降低短暂性脑缺血发作(transient ischemic attack, TIA)、脑卒中以及卒中相关死亡等发生风险。

2.1 MMD

MMD 是一种罕见、慢性、进行性脑血管疾病,特征是颈内动脉末端、大脑前动脉及大脑中动脉起始部狭窄和闭塞并伴随异常血管网的形成^[15]。目前缺乏有效的药物治疗,多数学者认为血管重建术可以改善症状及预防卒中等并发症^[16]。血管重建术主要包括直接、间接和联合重建 3 种,其中 EDAS 是治疗 MMD 最常见的间接手术。病例选择需符合 MMD 诊断与治疗指南^[17]的诊断标准,排除其他疾病引起的烟雾状综合征、患有严重全身系统性疾病以及依从性不佳、不接受定期随访者。已被广泛用作小儿 MMD 的标准治疗方法^[18,19]。Guo 等^[20]研究 EDAS 预防幼儿 MMD 脑卒中发生的长期疗效(随访 5 ~ 17 年),共纳入 69 例年龄 < 4 岁的幼儿,其中 81.2% (56/69) 的患儿临床疗效良好[改良 Rankin 量表(modified Rankin Scale, mRS)评分 < 3 分],有症状梗死和出血患者 10 年无事件生存率分

别为 92.8% 和 97.0%。邵冰水等^[21]纳入 32 例 EDAS 治疗和 24 例保守治疗的 MMD 患儿,治疗 3 个月后,EDAS 组 mRS 评分明显低于保守治疗组[(1.03 \pm 0.31) 分 vs. (1.96 \pm 0.64) 分, $P < 0.001$],EDAS 组再卒中发生率显著低于保守治疗组(6.25% vs. 25%, $P < 0.05$)。这些研究均表明 EDAS 可预防卒中复发,改善 MMD 患儿的长期预后。Guo 等^[22]回顾性分析 2005 ~ 2022 年 4 岁以下 MMD 患儿 EDAS 术前脑卒中的临床和放射学预后因素,结果显示家族史($OR = 8.88, 95\% CI: 0.91 \sim 86.83, P = 0.06$)、术前磁共振血管造影(magnetic resonance angiography, MRA)分级($OR = 8.72, 95\% CI: 3.44 \sim 22.07, P < 0.001$)、诊断时年龄($OR = 0.36, 95\% CI: 0.14 \sim 0.91, P = 0.031$)和诊断到手术的持续时间($OR = 1.38, 95\% CI: 1.14 \sim 1.67, P = 0.001$)是脑卒中的预测因素。因此,在整个治疗过程中,需要仔细观察、充分控制危险因素、优化手术时间,以预防术前脑卒中,尤其对于有家族史、术前 MRA 分级较高、从诊断到手术的时间超过 3.53 月、诊断时年龄 < 3 岁的患儿。此外,EDAS 在成人 MMD 患者中也显示出良好的临床效果^[23,24]。Wang 等^[23]研究分析 EDAS 在出血性 MMD 成年患者的长期预后并确定复发性出血的预后因素,在 8.5 年的中位随访期内,16.8% (16/95) 再次发生脑出血,症状出现的年龄($OR = 1.075, 95\% CI: 1.008 \sim 1.147, P = 0.028$)是卒中再出血的预后因素。Li 等^[25]回顾性分析 2007 ~ 2017 年 111 例老年 MMD (年龄 ≥ 60 岁),随访期间(> 5 年)EDAS 组和保守治疗组脑卒中发生率分别为 17.2% (10/58) 和 49.1% (26/53),即与保守治疗组相比,EDAS 组术后长期卒中发生率更低,长期卒中事件与高龄、动脉瘤和保守治疗后的初始缺血有关,EDAS 治疗后仅与初始出血有关。

EDAS 可用于各个年龄段 MMD 的治疗,合并其他疾病时效果可能存在差异。Gao 等^[26]探讨合并高同型半胱氨酸血症(hyperhomocysteinemia, HHcy)的成年 MMD 患者接受 EDAS 的效果,HHcy 组 36.6% (15/41) 患者 EDAS 术后临床症状不变或恶化,明显高于非 HHcy 组(7.3%, 6/82),认为 HHcy 可能是预测 MMD 患者 EDAS 术后不良临床结局的特异性指标,也是导致侧支循环不畅和预后

不良的预后因素,建议合并 HHcy 的 MMD 患者 EDAS 手术前严格控制同型半胱氨酸水平。Ren 等^[27]研究显示 2 型糖尿病 (type 2 diabetes mellitus, T2DM) 组 MMD 患者 EDAS 术后铃木分期更高 ($P < 0.01$),从颈外萌生侧支血管的发生率 (82.7%, 91/110) 较非糖尿病组 (72.2%, 153/212) 更高 ($P < 0.05$),即 T2DM 患者较非糖尿病患者可获得更好的侧支循环和临床改善。此外,一项前瞻性研究^[28]探讨 EDAS 联合中频电疗仪治疗 MMD 患儿的疗效,联合治疗组有效率 (92%, 23/25) 高于单纯 EDAS 治疗组 (68%, 17/25),即通过加入中频电疗仪,可在一定程度上改善患儿术后神经功能、肢体功能及生活能力。

综上所述,EDAS 可以用于各个年龄段 MMD 的治疗,合并其他疾病时效果可能存在差异,目前研究多为单中心回顾性研究,未来需要大样本随机对照研究 (randomized controlled trial, RCT) 验证疗效,此外,还应考虑个体差异进行个性化治疗以提高疗效。

2.2 ICAD

ICAD 是全球最常见的卒中病因之一^[29,30],即使优化医疗管理,卒中复发率和死亡率仍旧很高^[31,32]。RCT 表明血管成形术、支架置入术和血管重建术无法改善 ICAD 患者的预后^[33]。神经外科医生尝试应用 EDAS 治疗药物无效的 ICAD 患者,显示良好的治疗效果^[34,35]。因此,一般选择药物治疗无效的无症状 ICAD 患者进行 EDAS,并排除颅外段颈动脉狭窄、其他脑血管闭塞性疾病 (MMD、夹层或血管炎)、有严重全身系统性疾病以及不接受定期随访的患者。

2012 年 Dusick 等^[36]首次报道 EDAS 治疗 13 例 ICAD,中位随访时间 54 个月,2 例 TIA 发作,所有患者均未到达主要随访终点 (脑卒中或死亡),从而认为对于药物治疗失败且不适合接受血管内治疗的患者,EDAS 是一种选择。一项单中心研究^[6]对 EDAS 治疗成人 MMD 和颅内动脉粥样硬化性狭窄闭塞症 (intracranial atherosclerotic steno-occlusive disease, ICASD) 的长期预后进行分析,中位随访时间 22 个月,随访期间无出血或卒中相关死亡,MMD 组 ($n = 46$) 未发生卒中,ICASD 组 ($n = 36$) 2 年后无卒中存活率为 94.3% (95% CI: 80% ~ 98.6%),无 TIA 存活率为 89.4% (95% CI: 74.7% ~ 96%),

MMD 组无 TIA 存活率为 99.7% (95% CI: 87.5% ~ 99.9%),且所有患者的侧支循环均有所改善。Quintero-Consuegra 等^[34]对 52 例 ICAD 和边界区卒中中进行 24 个月随访,评估 EDAS 对卒中复发的影响,EDAS 治疗后卒中复发率 (10.7%, 3/28) 低于接受药物治疗者 (37%, 7/19; $P < 0.01$)。

Zhang 等^[35]纳入 125 例大脑中动脉闭塞的 ICAD,其中 60 例接受 EDAS,65 例药物治疗。在最初 6 个月的随访中,2 组不良事件 (大脑中动脉区域内的缺血以及任何原因导致的死亡) 发生率差异无显著性,平均随访 23.7 月,EDAS 组不良事件发生率 1.7% (1/57),显著低于对照组 10.9% (7/64, $P = 0.024$),认为 EDAS 对 ICAD 患者有效且安全,但短期内需要额外的药物治疗。一项 ERSIAS II 期试验研究对 EDAS 治疗 ICAD 的成本效益进行评估^[37],一组接受包括抗血小板治疗、控制血管危险因素及调整生活方式等精细化医疗管理 (intensive medical management, IMM) ($n = 52$),另一组 EDAS 联合 IMM ($n = 52$),结果显示治疗初期由于手术和围手术期护理的原因,联合治疗组成本较 IMM 组高,随着时间的推移,由于接受 EDAS 联合 IMM 治疗的患者卒中/死亡发生率较低,增量成本效益比 (incremental cost-effectiveness ratio, ICER) 由第 1 年 474 451.37 美元降至第 4 年 -19 152.65 美元,即 2 组成本差距逐渐缩小,2 ~ 3 年后联合治疗组低于单纯 IMM 组。Gonzalez 等^[38]报道 EDAS 联合 IMM 组主要终点事件 (术后 30 d 内卒中/死亡或超过 30 d 相关动脉供血区卒中) 发生率 (9.6%, 5/52) 较 IMM 组 (21.2%, 11/52) 低约 10%,认为 EDAS 治疗 ICAD 值得在 III 期临床试验中推进。

一系列研究证明 EDAS 可降低 ICAD 患者脑卒中和 TIA 复发的风险。此外,多项研究也已证明 EDAS 治疗 ICAD 具有较好的疗效以及经济效益。未来仍需要大型临床试验证实 EDAS 预防疗效优于单独药物治疗,以更好地在临床中推广。

总之,EDAS 治疗 MMD 和 ICAD 均展现出一定优势。尽管如此,部分研究认为单独 EDAS 不足以为整个皮质表面提供血管,在大多数患者中,仅在术野周围的有限区域内获得满意的血流;此外,由于血管侧支形成需要时间,无法快速改善脑血流量,部分患者在此期间存在围手术期缺血性脑卒中的风险。

因此,在选择 EDAS 时仍应考虑多种因素,更大程度上改善患者的预后。

3 EDAS 术前预测及术后评估方法

MMD 和 ICAD 均为脑血管异常改变的疾病,且 EDAS 术后侧支血管的增加与患者的预后密切相关,因此,影像学检查在 EDAS 术前预测及术后评估中十分重要。数字减影血管造影术(digital subtract angiography, DSA)是 MMD 诊断的金标准,通常也被认为是评估 EDAS 术后 MMD 患者侧支血管形成的标准方法。然而,这种方法仅利用血管形态来描述血液供应,无法全面反映脑血流动力学状态,也无法量化脑灌注^[39,40]。近年来,CT 血管造影(CT angiography, CTA)和 MRA 等成为评估脑灌注的重要成像方法,逐渐成为 DSA 的可靠补充手段。Yuan 等^[41]应用 CT 灌注成像(CT perfusion, CTP)评估 EDAS 手术前后手术区域的脑组织灌注改变,EDAS 术后局部脑血流量(relative cerebral blood flow, rCBF)显著增加 $[(1.04 \pm 0.36) \text{ ml}/(100 \text{ g} \cdot \text{min}) \text{ vs. } (1.20 \pm 0.35) \text{ ml}/(100 \text{ g} \cdot \text{min}), P = 0.013]$,相对平均通过时间(relative mean transit time, rMTT) $[(1.64 \pm 0.68) \text{ s vs. } (1.29 \pm 0.42) \text{ s}, P < 0.001]$ 与相对达峰时间(relative time to peak, rTTP) $[(1.26 \pm 0.22) \text{ s vs. } (1.10 \pm 0.10) \text{ s}, P < 0.001]$ 降低,认为 CTP 在客观评估 MMD 术后血管重建方面具有潜力。但这些均为管腔内成像技术,无法观察血管壁的情况,高分辨 MRI (high-resolution magnetic resonance imaging, HRMRI)可以在测量血管狭窄的同时分析斑块成分等生物学特性,有利于鉴别 MMD 及动脉粥样硬化相关烟雾状血管病(atherosclerosis-associated moyamoya vasculopathy, AS-MMV)。Lu 等^[42]利用 HRMRI 对 EDAS 治疗 MMD 和 AS-MMV 的长期疗效和手术优势进行评价,纳入 1173 例,其中 MMD 881 例,AS-MMV 292 例,MMD 患者发生缺血性脑卒中的风险显著高于 AS-MMV 患者(13.7% vs. 7.2%, $HR = 1.86, 95\% \text{ CI}: 1.17 \sim 2.96, P < 0.01$),此外,与未接受 EDAS 治疗患者相比,无论是 MMD 患者($HR = 0.65, 95\% \text{ CI}: 0.42 \sim 0.97, P < 0.05$)还是 AS-MMV 患者($HR = 0.49, 95\% \text{ CI}: 0.51 \sim 0.98, P < 0.05$),接受 EDAS 治疗的患者不良事件发生率均更低。该研究结果表明,HRMRI 可

用于识别未来发生脑血管事件风险较高的人群,同时也验证了 EDAS 能够预防脑卒中的复发。

此外,超声技术具有无辐射、可重复性强的优势,也可应用于术前诊断,术中实时监测以及术后评估等多个阶段。Wang 等^[43]探讨彩色多普勒超声成像(color Doppler ultrasonography, CDU)在 EDAS 术前预测和术后评估 MMD 患者血管再通的侧支发展的价值,结果显示手术前后侧支发育良好组颞浅动脉(superficial temporal artery, STA)的舒张末期速度(end-diastolic velocity, EDV)高于侧支发育不良组($P < 0.01$),且术后 STA 的 EDV 明显高于术前,表明 CDU 可通过检测 STA 的超声参数,在 MMD 患者术前预测和术后评估侧支的发展情况。

综上所述,多种方法均可用于 EDAS 术前预测及术后评估治疗情况,应根据病人情况考虑包括经济、方便、创伤小等在内的因素选择合适的评估方法。此外,还需对患者进行长期、定期的随访,以获取患者的存活率,脑卒中的发生率或复发率以及心肌梗死、严重非卒中出血(全身、硬膜下或硬膜外出血)等并发症的发生情况。

4 小结

EDAS 的目的主要集中于尽可能降低脑卒中的复发率,提高患者生活质量。未来仍需多维度探讨 EDAS 治疗慢性血管闭塞,如 MMD 和 ICAD 的潜在机制,同时开展多中心、大样本、前瞻性 RCT 探索 EDAS 治疗 MMD 和 ICAD 的疗效。

参考文献

- 1 Matsushima Y, Aoyagi M, Suzuki R, et al. Perioperative complications of encephalo-duro-arterio-syngangiosis: prevention and treatment. *Surg Neurol*, 1991, 36(5): 343 - 353.
- 2 Deng X, Gao F, Zhang D, et al. Effects of different surgical modalities on the clinical outcome of patients with moyamoya disease: a prospective cohort study. *J Neurosurg*, 2018, 128(5): 1327 - 1337.
- 3 Park SE, Kim JS, Park EK, et al. Direct versus indirect revascularization in the treatment of moyamoya disease. *J Neurosurg*, 2018, 129(2): 480 - 489.
- 4 Wang QN, Zou ZX, Wang XP, et al. Endothelial progenitor cells induce angiogenesis: a potential mechanism underlying neovascularization in encephaloduroarteriosyngangiosis. *Transl Stroke Res*, 2021, 12(2): 357 - 365.

- 5 Bao XY, Fan YN, Wang QN, et al. The potential mechanism behind native and therapeutic collaterals in moyamoya. *Front Neurol*, 2022, 13:861184.
- 6 Gonzalez NR, Dusick JR, Connolly M, et al. Encephaloduroarteriosyngiosis for adult intracranial arterial stenocclusive disease: long-term single-center experience with 107 operations. *J Neurosurg*, 2015, 123(3):654-661.
- 7 贾红芳, 叶雪, 赵颖, 等. 他汀类药物防治脑卒中的作用机理、用药指导及不良反应. *中国药物滥用防治杂志*, 2023, 29(10):1768-1770, 1779.
- 8 Wang QN, Bao XY, Zou ZX, et al. The role of atorvastatin in collateral circulation formation induced by encephaloduroarteriosyngiosis: a prospective trial. *Neurosurg Focus*, 2021, 51(3):E9.
- 9 Gao G, Wang QN, Hao FB, et al. To explore the effectiveness of atorvastatin in the postoperative formation of collateral blood vessels after encephaloduroarteriosyngiosis in patients with moyamoya disease: a prospective double-blind randomized controlled study. *Front Neurol*, 2023, 14:1169253.
- 10 王彤, 任蒙蒙, 徐陆正, 等. 光、磁成像法探测脑胶质瘤微环境脑组织间隙结构及脑组织间液引流的变化. *中国微创外科杂志*, 2020, 20(1):46-51.
- 11 Gao Y, Han H, Du J, et al. Early changes to the extracellular space in the hippocampus under simulated microgravity conditions. *Sci China Life Sci*, 2022, 65(3):604-617.
- 12 Yue X, Mei Y, Zhang Y, et al. New insight into alzheimer's disease: light reverses abeta-obstructed interstitial fluid flow and ameliorates memory decline in APP/PS1 mice. *Alzheimers Dement (N Y)*, 2019, 5:671-684.
- 13 Cai X, He Q, Wang W, et al. Epidural pulsation accelerates the drainage of brain interstitial fluid. *Aging Dis*, 2023, 14(1):219-228.
- 14 周洁, 连婧阁, 任秋实, 等. 磁示踪法在硬膜外动脉贴敷术加速丘脑组织间液引流机制研究中的应用. *磁共振成像*, 2023, 14(2):97-102.
- 15 陈军, 李爱民, 陈震, 等. 血管重建手术与保守治疗出血性烟雾病的疗效分析. *中国微创外科杂志*, 2015, 15(12):1084-1087.
- 16 Acker G, Fekonja L, Vajkoczy P. Surgical management of moyamoya disease. *Stroke*, 2018, 49(2):476-482.
- 17 烟雾病和烟雾综合征诊断与治疗中国专家共识编写组, 国家卫生计生委脑卒中防治专家委员会缺血性卒中外科专业委员会. 烟雾病和烟雾综合征诊断与治疗中国专家共识(2017). *中华神经外科杂志*, 2017, 33(6):541-547.
- 18 Choi JW, Chong S, Phi JH, et al. Postoperative symptomatic cerebral infarction in pediatric moyamoya disease: risk factors and clinical outcome. *World Neurosurg*, 2020, 136:e158-e164.
- 19 Riordan CP, Storey A, Cote DJ, et al. Results of more than 20 years of follow-up in pediatric patients with moyamoya disease undergoing pial syngiosis. *J Neurosurg Pediatr*, 2019, 23(5):586-592.
- 20 Guo Q, Fan YN, Wang QN, et al. Nomogram for predicting long-term outcomes of encephaloduroarteriosyngiosis in toddlers with moyamoya disease: a longitudinal and cross-sectional study. *Transl Stroke Res*, Published online November 9, 2023.
- 21 邵冰水, 王国文, 靳腾龙. 脑硬膜颞浅动脉血管融通术对缺血性烟雾病儿童预后的影响. *河南医学高等专科学校学报*, 2024, 36(1):27-30.
- 22 Guo Q, Pei S, Wang QN, et al. Risk factors for preoperative cerebral infarction in infants with moyamoya disease. *Transl Stroke Res*, Published online June 14, 2023.
- 23 Wang QN, Bao XY, Zhang Y, et al. Encephaloduroarteriosyngiosis for hemorrhagic moyamoya disease: long-term outcome of a consecutive series of 95 adult patients from a single center. *J Neurosurg*, 2019, 130(6):1898-1905.
- 24 Duan L, Bao XY, Yang WZ, et al. Moyamoya disease in China: its clinical features and outcomes. *Stroke*, 2012, 43(1):56-60.
- 25 Li JJ, Wang XP, Wang QN, et al. Long-term outcomes after conservative and EDAS treatment for 111 elderly patients with moyamoya disease: longitudinal and cross-sectional study. *J Neurosurg*, 2023, 140(3):800-808.
- 26 Gao G, Hao FB, Wang QN, et al. Surgical outcomes following encephaloduroarteriosyngiosis in moyamoya disease associated with hyperhomocysteinemia. *Brain Behav*, 2023, 13(8):e3093.
- 27 Ren B, Zhang ZS, Liu WW, et al. Surgical outcomes following encephaloduroarteriosyngiosis in adult moyamoya disease associated with type 2 diabetes. *J Neurosurg*, 2016, 125(2):308-314.
- 28 胡绘平, 刘文春, 肖龙敏. 脑硬膜颞浅动脉血管融通术联合中频电疗仪对缺血性烟雾病患儿的临床疗效. *实用临床医药杂志*, 2021, 25(22):95-98.
- 29 Prabhakaran S, Liebeskind DS, Cotsonis G, et al. Predictors of early infarct recurrence in patients with symptomatic intracranial atherosclerotic disease. *Stroke*, 2021, 52(6):1961-1966.
- 30 Jia B, Zhang X, Ma N, et al. Comparison of drug-eluting stent with bare-metal stent in patients with symptomatic high-grade intracranial atherosclerotic stenosis: a randomized clinical trial. *JAMA Neurol*, 2022, 79(2):176-184.
- 31 Wabnitz AM, Derdeyn CP, Fiorella DJ, et al. Hemodynamic markers in the anterior circulation as predictors of recurrent stroke in patients with intracranial stenosis. *Stroke*, 2019, 50(1):143-147.
- 32 Derdeyn CP, Chimowitz MI, Lynn MJ, et al. Aggressive medical treatment with or without stenting in high-risk patients with intracranial artery stenosis (SAMMPRIS): the final results of a randomised trial. *Lancet*, 2014, 383(9914):333-341.
- 33 Zaidat OO, Fitzsimmons BF, Woodward BK, et al. Effect of a

- balloon-expandable intracranial stent vs medical therapy on risk of stroke in patients with symptomatic intracranial stenosis; the VISSIT randomized clinical trial. *JAMA*, 2015, 313(12):1240-1248.
- 34 Quintero-Consuegra MD, Toscano JF, Babadjouni R, et al. Encephaloduroarteriosynangiosis averts stroke in atherosclerotic patients with border-zone infarct: post hoc analysis from a performance criterion phase II trial. *Neurosurgery*, 2021, 88(4):E312-E318.
- 35 Zhang Q, Li Y, Tong H, et al. Comparison of therapeutic efficacy between isolated encephaloduroarteriosynangiosis and medical treatment in patients with atherosclerotic middle cerebral artery occlusion. *World Neurosurg*, 2018, 117:e483-e492.
- 36 Dusick JR, Liebeskind DS, Saver JL, et al. Indirect revascularization for nonmoyamoya intracranial arterial stenoses: clinical and angiographic outcomes. *J Neurosurg*, 2012, 117(1):94-102.
- 37 Gonzalez NR, Quintero-Consuegra MD, Chan JL, et al. Cost-effectiveness analysis of encephaloduroarteriosynangiosis surgery for symptomatic intracranial atherosclerotic disease. *Neurosurgery*, 2022, 90(4):495-500.
- 38 Gonzalez NR, Jiang H, Lyden P, et al. Encephaloduroarteriosynangiosis (EDAS) revascularization for symptomatic intracranial atherosclerotic steno-occlusive (ERSIAS) Phase-II objective performance criterion trial. *Int J Stroke*, 2021, 16(6):701-709.
- 39 Bao XY, Zhang Y, Wang QN, et al. Long-term outcomes after encephaloduroarteriosynangiosis in adult patients with moyamoya disease presenting with ischemia. *World Neurosurg*, 2018, 115:e482-e489.
- 40 Kronenburg A, Bulder MMM, Bokkers RPH, et al. Cerebrovascular reactivity measured with ASL perfusion MRI, ivy sign, and regional tissue vascularization in moyamoya. *World Neurosurg*, 2019, 125:e639-e650.
- 41 Yuan X, Yu H, Sun Z, et al. Evaluation of surgical revascularization procedure outcomes for adult moyamoya disease: a computed tomography perfusion-based study. *Insights Imaging*, 2023, 14(1):184.
- 42 Lu M, Zhang H, Liu S, et al. Long-term outcomes of moyamoya disease versus atherosclerosis-associated moyamoya vasculopathy using high-resolution MR vessel wall imaging. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2023, 94(7):567-574.
- 43 Wang JZ, Mu J, Zhang D, et al. Clinical use of color Doppler ultrasonography to predict and evaluate the collateral development of two common revascularizations in patients with moyamoya disease. *Front Neurol*, 2022, 13:976695.

(收稿日期:2024-05-10)

(修回日期:2024-05-30)

(责任编辑:李贺琼)