



电子、语音版

·论著·

缺血型烟雾病手术疗效的多中心研究

汤东^{1,2}, 黄正^{1,2}, 丁威³, 吴水华³, 陈华⁴, 王君宇^{1,2}, 陈风华^{1,2}

1. 中南大学湘雅医院神经外科, 湖南长沙 410008
2. 中南大学脑血管病研究中心, 湖南长沙 410008
3. 湖南省儿童医院神经外科, 湖南长沙 410007
4. 常德市第一医院神经外科, 湖南常德 415003

摘要:目的 通过多中心回顾性研究探讨脑血运重建术及不同手术方式在预防脑卒中再发生及神经功能预后的疗效。方法 研究纳入了中南大学湘雅医院、常德市人民医院和湖南省儿童医院 462 例缺血型烟雾病患者的临床信息、影像学资料和随访资料, 进行倾向性评分匹配后采用 Kaplan-Meier 曲线比较手术与保守治疗后卒中再发生的差异; 多因素 Cox 回归分析筛选手术治疗的影响因素。结果 462 例烟雾病患者平均随访时间为 33.6 个月, 242 例手术治疗和 220 例保守治疗患者中分别有 31 例 (12.8%) 和 63 例 (28.6%) 新发脑卒中, 进行倾向性评分匹配后, 185 例手术治疗和 185 例保守治疗患者纳入进一步分析。Kaplan-Meier 曲线分析显示两者新发脑卒中中存在差异 ($P=0.018$); 多因素 Cox 生存分析提示后循环受累 (95% CI: 2.343~11.375, $P<0.001$) 和脑白质病变 (95% CI: 1.083~4.828, $P=0.030$) 是手术后卒中再发的危险因素, 两种手术方式 (联合和间接血运重建术) 在卒中再发生预防方面无统计学差异 ($P=0.777$)。结论 与保守治疗相比, 手术能降低缺血型烟雾病卒中再发生的风险和取得良好预后, 不同手术方式对防止脑卒中再发生无差异。 [国际神经病学神经外科学杂志, 2024, 51(2): 23-28]

关键词: 烟雾病; 脑血运重建术; 脑卒中; 预后

中图分类号: R651.1

DOI: 10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2024.02.005

Efficacy of surgical revascularization for stroke prevention and prognosis in ischemic-type moyamoya disease: A multicenter study

TANG Dong^{1,2}, HUANG Zheng^{1,2}, DING Wei³, WU Shuihua³, CHEN Hua⁴, WANG Junyu^{1,2}, CHEN Fenghua^{1,2}

1. Department of Neurosurgery, Xiangya Hospital, Central South University, Changsha, Hunan 410008, China

2. Research Center for Cerebrovascular Disease, Central South University, Changsha, Hunan 410008, China

3. Department of Neurosurgery, Hunan Children's Hospital, Changsha, Hunan 410007, China

4. Department of Neurosurgery, The First People's Hospital of Changde City, Changde, Hunan 415003, China

Corresponding author: CHEN Fenghua, Email: xycfh@163.com

Abstract: **Objective** To investigate the efficacy of cerebral revascularization (different surgical procedures) for stroke prevention and prognosis in ischemic-type moyamoya disease (MMD) through a multicenter retrospective study. **Methods** Clinical, neuroradiologic, and follow-up data of 462 patients with ischemic-type MMD from Xiangya Hospital of Central South University, Changde People's Hospital, and Hunan Children's Hospital were analyzed in this study. Propensity score matching was performed, and then the Kaplan-Meier curve was used to compare the recurrence rate of stroke between the patients receiving surgical treatment and those receiving conservative treatment. A multivariable Cox regression analysis was performed to identify the risk factors for stroke recurrence after surgical treatment. **Results** The mean follow-up time was 33.6 months in the 462 patients. Stroke occurred in 31 (12.8%) of the 242 surgically treated patients and 63 (28.6%)

基金项目: 湖南省科技重大专项 (2020SK1012)。

收稿日期: 2023-12-05; 修回日期: 2024-04-10

通信作者: 陈风华, 中南大学湘雅医院神经外科教授、主任医师、博士研究生导师, 研究方向为脑血管病的临床与基础研究, 邮箱: xycfh@163.com。

of the 220 conservatively treated patients. A total of 185 pairs were selected through propensity score matching. The Kaplan-Meier curve showed a significant difference in the incidence of recurrent stroke between the two groups ($P=0.018$). The multivariable Cox regression analysis revealed that posterior cerebral artery involvement (95% confidence interval [CI]: 2.343–11.375, $P<0.001$) and cerebral white matter hyperintensities (95% CI: 1.083–4.828, $P=0.030$) were risk factors for stroke recurrence after surgery. There was no significant difference between the two surgical procedures (combined and indirect revascularization) in the prevention of recurrent stroke ($P=0.777$). **Conclusions** Compared with conservative treatment, surgical revascularization can reduce the incidence of recurrent stroke and achieve favorable outcome in ischemic-type MMD, and different surgical procedures are similar in preventing recurrent stroke.

[Journal of International Neurology and Neurosurgery, 2024, 51(2): 23–28]

Keywords: moyamoya disease; cerebral revascularization; stroke; prognosis

烟雾病(moyamoya disease, MMD)是一种慢性进展性脑血管疾病,表现为颈内动脉末端和/或大脑前动脉、大脑中动脉近端狭窄或闭塞,并伴有颅底异常血管网形成^[1]。MMD主要有两种临床表现,即脑缺血或脑出血^[2],其中脑缺血多见于5~10岁儿童和部分成人^[3]。目前手术治疗是治疗MMD的主要方式,包括直接血运重建术、间接血运重建术和联合血运重建术^[4]。对于出血型MMD,一项多中心、前瞻性、随机对照研究证实了直接血运重建术能降低再出血的风险^[5],然而对于缺血型MMD,目前无多中心随机对照研究。因此,本研究回顾性分析3个医院的462例缺血型MMD的临床、影像学特征和长期随访结果,评估手术疗效。

1 资料与方法

1.1 临床资料

首先建立一个多中心的MMD临床数据库,包括中南大学湘雅医院、常德市人民医院和湖南省儿童医院烟雾病患者,纳入标准如下:①经脑血管造影诊断为MMD^[2];②单侧或双侧MMD;③缺血型MMD;④手术治疗(脑血运重建术)或保守治疗。排除指标:①烟雾综合征,如烟雾样血管改变合并自身免疫性疾病、脑部肿瘤、脑膜炎、头部创伤、唐氏综合征、Recklinghausen病等;②出血型烟雾病;③临床资料不完整;④失访或随访时间小于6个月。

1.2 影像学评价

影像学评价指标包括单/双侧病变、脑白质病变、铃木分期、后循环受累、合并动脉瘤。铃木分期(Suzuki's classification)对术前血管造影进行血管狭窄程度的评估^[6],将IV、V定义为高铃木分期。脑白质高信号(white matter hyperintensities, WMHs)定义为在T2WI或T2液体衰减反转恢复序列(fluid attenuated inversion recovery, FLAIR)上,大脑深部脑白质或脑室周围的点线状或斑片状高信号^[7]。后循环受累指伴有大脑后动脉狭窄的患者。是否合并动脉瘤根据脑血管造影进行诊断^[8]。

1.3 治疗方式

MMD的手术治疗方式主要有3种:直接血运重建术

(direct bypass, DB)、间接血运重建术(indirect bypass, IB)和联合血运重建术(combined bypass, CB)^[9]。DB采用颞浅动脉(STA)-大脑中动脉(MCA)皮质分支端侧吻合,IB将颞肌、颞浅动脉、硬脑膜等带血运的组织贴附在大脑皮层^[10],CB是将上述两种手术方式联合运用。3个中心均采用IB或CB,手术方式及术式选择标准一致。手术指征包括:①患者有临床症状,如脑梗死、脑出血、癫痫发作等;②CT或磁共振灌注成像提示低灌注;③患者及家属要求手术。对于双侧烟雾病患者,先行有症状侧或脑灌注不足侧;如患者为脑出血、脑梗死急性期,一般2个月后再进行脑血运重建术。采取手术前一晚予以补液和术后2~3 d维持24 h补液降低围手术期缺血事件的发生^[11]。

1.4 随访

采用电话或门诊对患者进行随访。研究的主要结局事件为新发卒中及其引起的死亡,研究的次要结局事件为预后。脑卒中是指有新发的卒中相关神经系统症状或体征,且CT、MRI等影像学上有新发脑梗死或脑出血。手术治疗组脑卒中包括围手术期卒中和随访期卒中。患者预后评价根据改良Rankin量表(modified Rankin scale, mRS)进行评价,其中mRS评分 ≥ 3 分定义为预后不良。

1.5 统计学方法

使用IBM SPSS软件(版本25.0)进行。连续变量采用均值 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,非正态分布的变量资料采用中位数 \pm 四分位数间距 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示。为比较手术治疗和保守治疗在预防脑卒中发生的疗效,笔者采用倾向性评分匹配(tendency score matching, PSM),通过Logistic回归分析计算患者倾向评分值,选择1:1最近邻匹配法,卡尺值为0.2。匹配后采用Kaplan-Meier曲线法比较两组之间脑卒中发生,并使用Log-rank检验进行统计学检验,采用 χ^2 检验比较两组患者预后(mRS评分)。为评价不同手术方式对预防脑卒中发生的疗效,笔者采用Kaplan-Meier曲线和多因素Cox回归分析,纳入了年龄、性别、脑卒中危险因素、手术方式、脑梗死、高铃木分期、双侧病变、后循环受累、颅内动脉瘤。其中多因素Cox回归分析

模块1是所有变量纳入分析,模块2是向前的似然法。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基本特征

多中心烟雾病数据库共纳入 725 名 MMD 患者。其中,192 名为出血型 MMD,30 例患者临床数据缺失。我们对 503 名患者进行了随访,其中 41 名患者(8.1%)失访或随访时间小于 12 个月,最终 462 例纳入研究(表 1)。在 462 例患者中,190 名(41%)为男性,272 名(59.1%)为女性;年龄 1~75 岁,平均 36.83 岁;178(38.5%)名患者合并有脑卒中危险因素,包括高血压、糖尿病、高脂血症、高尿酸血症、高同型半胱氨酸血症、吸烟、饮酒。220 例患者接受保守治疗,242 例患者接受手术治疗,包括 95 例行间接血运重建术,147 例接受联合血运重建术。

2.2 影像学评价

72 名(15.6%)患者为单侧烟雾病。96 名(20.8%) Suzuki 分期为高分期(V 和 VI 期)。73 名(15.8%)有后循环受累,59 名(12.8%)合并颅内动脉瘤,156 名(33.8%)有脑白质病变。

2.3 随访

462 例患者平均随访 33.6 个月(6~107 个月)。对于 242 例手术治疗患者,31 名(12.8%)发生了围手术期及随访期脑卒中,包括 8 例围手术期卒中,23 例随访期卒中。随访期 9 例(3.7%)发生死亡,其中与卒中相关的有 2 例。220 例保守治疗患者中,63 例(28.6%)新发脑卒中,8 例(3.6%)发生死亡,其中与卒中相关的有 3 例。

2.4 疗效评价

对 462 例患者采取了倾向性评分匹配,最终 370 例患者纳入匹配后数据分析,包括 185 例手术治疗和 185 例保守治疗(表 2)。31(12.8%)例手术治疗和 63(28.6%)例保守治疗患者新发脑卒中,Kaplan-Meier 曲线分析提示有统计学差异($P=0.018$,图 1)。在最终随访时间点,48 例保守治疗和 31 例手术治疗患者 mRS 评分 ≥ 3 分,因此与保守治疗患者相比较,手术治疗患者预后不良比率更低

表 1 462 例缺血型 MMD 患者基线特征 例(%)

类别	例数
年龄	
成人	367(79.4%)
儿童	95(20.6%)
性别	
男	190(41.1%)
女	272(59.1%)
治疗方式	
手术治疗	242(52.4%)
保守治疗	220(47.6%)
手术方式	
间接血运重建术	115(43.8%)
联合血运重建术	147(56.1%)
脑血管病危险因素	178(38.5%)
脑白质病变	156(33.8%)
入院时脑梗死	262(56.7%)
入院时 mRS 评分 ≥ 2	102(22.1%)
双侧病变	390(84.4%)
铃木分期	
I~IV	366(79.2%)
V~VI	96(20.8%)
后循环受累	73(15.8%)
合并动脉瘤	59(12.8%)
随访	
脑卒中发生	94(20.3%)
死亡	17(3.7%)
神经功能改善	292(63.2%)

(21.8% vs 12.8%; $P=0.010$)。

为了探讨不同手术方式对于降低脑卒中再发生的疗效(基本资料见表 3),我们对 242 例手术治疗患者进行了 Cox 生存分析,多因素 Cox 生存分析提示后循环受累($HR: 5.162, 95\% CI: 2.343-11.375, P < 0.001$)和脑白质病变($HR: 2.287, 95\% CI: 1.083-4.828, P=0.030$)是脑卒中再发的危险因素,两种手术方式(联合血运重建术和间接血运重建术)在预防术后脑卒中再发生方面比较,差异无统计学意义($P=0.777$)(表 4,图 2)。

表 2 缺血型烟雾病手术治疗与保守治疗 PSM 前后基线特征

项目	匹配前				匹配后			
	手术治疗组	保守治疗组	χ^2 值	P 值	手术治疗组	保守治疗组	χ^2 值	P 值
人数	242	220	-	-	185	185	-	-
性别(男)	104	86	0.718	0.397	74	71	0.102	0.749
年龄(儿童)	62	33	7.957	0.005	25	29	0.347	0.556
脑卒中危险因素	83	102	6.988	0.008	72	74	0.045	0.832
既往脑梗死	130	132	1.852	0.174	105	106	0.011	0.916
脑白质病变	80	76	0.114	0.736	63	65	0.048	0.827
铃木分期(V+VI期)	55	41	1.172	0.279	41	34	0.819	0.365
双侧病变	213	177	5.009	0.025	157	159	0.087	0.768
后循环受累	41	32	0.498	0.481	31	27	0.327	0.567
合并动脉瘤	29	30	0.282	0.595	29	25	0.347	0.556

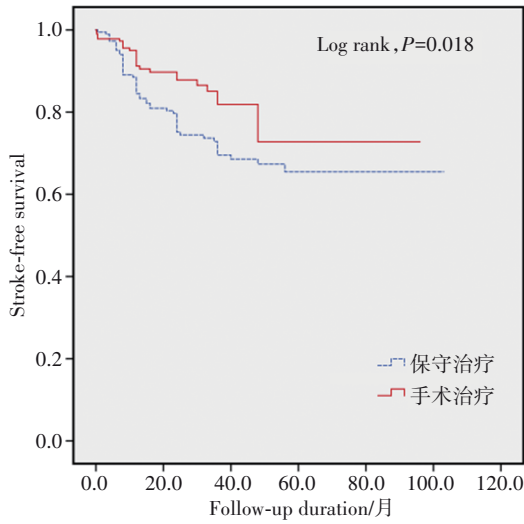


图1 缺血型烟雾病保守治疗与手术治疗组脑卒中再发的Kaplan-Meier曲线

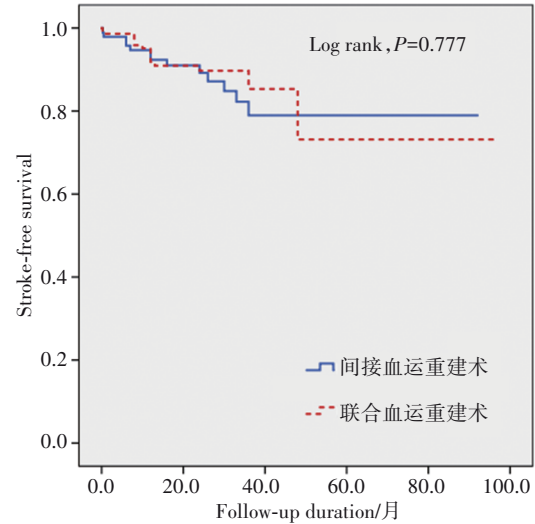


图2 缺血型烟雾病不同手术方式术后脑卒中再发的Kaplan-Meier曲线

表3 缺血型烟雾病患者不同手术方式的临床资料比较

项目	间接血运重建术	联合血运重建术
患者人数/例	95	147
年龄/(岁, $\bar{x} \pm s$)	20.16±18.46	42.55±10.63
性别(男:女)	1:1.06	1:1.53
脑卒中危险因素例(%)	25(26.3)	66(44.8)
脑白质病变例(%)	30(31.6)	50(34.0)
脑梗死例(%)	50(52.6)	80(54.4)
双侧病变例(%)	83(87.4)	130(88.4)
高铃木分期(V+VI期)例(%)	19(20.0)	35(23.8)
后循环受累例(%)	15(15.8)	26(17.7)
合并颅内动脉瘤例(%)	6(6.3)	23(15.6)

表4 缺血型烟雾病手术治疗后脑卒中发生的危险因素分析

类别	Kaplan-Meier曲线		多因素COX回归(模块1)		多因素COX回归(模块2)		
	P值	HR	95%CI	P值	HR	95%CI	P值
年龄	-	1.020	0.992~1.049	0.165	-	-	-
性别(男)	0.323	1.432	0.651~3.151	0.372	-	-	-
脑卒中危险因素	0.248	1.180	0.499~2.792	0.706	-	-	-
脑梗死	0.342	1.558	0.741~3.275	0.242	-	-	-
双侧病变	0.596	1.031	0.298~3.571	0.962	-	-	-
高铃木分期(V+VI期)	0.411	0.535	0.192~1.496	0.234	-	-	-
后循环受累	0.000	5.162	2.343~11.375	0.000	4.266	2.058~8.842	0.000
脑白质病变	0.113	2.287	1.083~4.828	0.030	2.152	1.042~4.444	0.038
合并颅内动脉瘤	0.286	0.366	0.081~1.657	0.192	-	-	-
术式(联合血运重建)	0.777	0.495	0.183~1.339	0.166	-	-	-

3 讨论

脑血运重建术通过增加脑血流量和改善脑灌注,从而防止脑卒中的发生,是MMD的主要治疗方式^[12]。目前全世界只开展了一项多中心随机对照研究评价手术疗效^[5],日本成人MMD研究(the Japan Adult Moyamoya

Trial)纳入80例成人出血型MMD,包括42例手术治疗和38例保守治疗患者,平均随访4.32年后证实手术治疗能够防止卒中发生(再出血、致残性卒中),但P值位于临界点(P=0.048),对于缺血型MMD,目前无随机对照研究证实手术有效性。

对于缺血型 MMD,手术有效性还存在一定争议。Wouters 等^[13]于 2019 年发表一项 Meta 研究,其亚组分析纳入三项研究 692 例缺血型患者,未证实手术的有效性。同样的结果也被中国作者 Li 等^[14]证实,他们纳入 4 项研究进行 Meta 分析,手术与保守治疗对于预防卒中方面无差异。对于成人缺血型 MMD,一项 Meta 分析纳入 5 项单中心回顾性研究数据,发现与保守治疗相比较,手术治疗脑卒中再发的相对危险度为 0.54 (95% CI: 0.28~1.01, P= 0.06)^[15] (表 5^[16-20])。对于儿童 MMD,一项多中心队列研究纳入

214 例手术治疗和 68 例保守治疗患者,平均 41 个月随访发现手术能防止脑卒中再发生 (2.8% vs 13.2%; RR: 0.21, 95% CI: 0.08~0.57)^[21],但是该研究中 12.5% 患者为出血型。本研究发现手术治疗组卒中再发生率为 12.8%,保守治疗组卒中再发生率为 28.6%,经过倾向性评分匹配后证实手术能防止脑卒中发生 (P=0.018),且手术治疗组的预后更佳 (P=0.031)。因此对于成人和儿童缺血型 MMD,积极开展脑血运重建术可能获得良好的预后。

表 5 缺血型烟雾病手术与保守治疗疗效比较的文献汇总

序号	作者及发表年份	病例数	手术方式	平均随访时间	卒中发生率(手术 vs 保守)
1	Noh HJ, et al, 2015	104 例成人	联合或间接	46 个月	26. 6% vs 13. 5%, RR:2. 32 [95%CI:0. 86~6. 28]
2	Ye F, et al. 2020	132 例成人	联合或间接	33 个月	1. 90% vs 13. 9%, RR:0. 12 [95%CI:0. 02~0. 95]
3	Jang DK, et al, 2017	249 例成人	联合或间接	42 个月	16. 5% vs 25. 3%, RR:0. 48 [95%CI:0. 27~0. 86]
4	Kim T, et al, 2016	142 例成人	联合或间接	45 个月	9. 40% vs 19. 6%, RR:0. 52 [95%CI:0. 03~0. 84]
5	Lee SB, et al, 2012	98 例成人	联合或间接	55 个月	19. 0% vs 67. 0%, RR:0. 12 [95%CI:0. 03~0. 52]

MMD 手术方式包括直接、间接和联合血运重建术,对于不同年龄和类型的患者,不同手术方式有效性存在一定差异。对于成人缺血型 MMD,一项 Meta 分析纳入 5 项研究数据共 647 例患者,与间接血运重建术相比较,直接/联合血运重建术在预防卒中发生 (RR:0.58, 95% CI: 0.24~1.39) 和降低致残率 (RR:0.85, 95% CI: 0.47~1.54) 均不存在差异^[15]。对于儿童型 MMD,目前有 2 个研究比较间接和联合血运重建术的疗效^[22-23]。Parray^[22]对 64 例儿童进行了平均 6.6 年随访,发现手术和保守治疗组均无脑卒中再发生。另一项研究纳入 58 例联合血运重建术和 50 例间接血运重建术,脑卒中发生率分别为 5% 和 2%^[23]。一项 Meta 分析纳入 33 项研究共 1992 例患者,平均随访 6.5 年后发现间接血运重建术的卒中发生率为 5.24%,直接/联合血运重建术的卒中发生率为 5.87%,但是这个 Meta 分析没有对缺血型和出血型患者进行亚组分析^[24]。类似于既往研究,笔者未能发现间接和联合血运重建术对于缺血型 MMD 患者在降低脑卒中再发生的差异,因此对于这类患者,两种手术方式可能都是有效的治疗。

本研究存在一定的不足。首先,这是一个多中心回顾性研究,虽然采用倾向性评分匹配,但仍可能存在一定偏倚,未来还需要开展随机对照研究证实手术的有效性;其次,本研究儿童手术方式主要为间接血运重建术,成人手术方式主要为联合血运重建术,未来需要纳入更多病例来探讨不同年龄类型的手术方式有效性;最后,本研究的随访时间较短。

参 考 文 献

[1] IHARA M, YAMAMOTO Y, HATTORI Y, et al. Moyamoya disease: diagnosis and interventions[J]. Lancet Neurol, 2022, 21 (8): 747-758.

[2] Research Committee on the Pathology and Treatment of Spontaneous Occlusion of the Circle of Willis, Health Labour Sciences Research Grant for Research on Measures for Infractable Diseases. Guidelines for diagnosis and treatment of moyamoya disease (spontaneous occlusion of the circle of Willis) [J]. Neurol Med Chir (Tokyo), 2012, 52(5): 245-266.

[3] SUZUKI J, KODAMA N. Moyamoya disease-a review[J]. Stroke, 1983, 14(1): 104-109.

[4] KURODA S, HOUKIN K. Moyamoya disease: current concepts and future perspectives[J]. Lancet Neurol, 2008, 7(11): 1056-1066.

[5] MIYAMOTO S, YOSHIMOTO T, HASHIMOTO N, et al. Effects of extracranial-intracranial bypass for patients with hemorrhagic moyamoya disease: results of the Japan adult moyamoya trial[J]. Stroke, 2014, 45(5): 1415-1421.

[6] SUZUKI J, TAKAKU A. Cerebrovascular "moyamoya" disease. Disease showing abnormal net-like vessels in base of brain[J]. Arch Neurol, 1969, 20(3): 288-299.

[7] LEMPRIÈRE S. White matter hyperintensities - location matters [J]. Nat Rev Neurol, 2023, 19(3): 129-129.

[8] 张晓斌, 黄理金. 烟雾病合并动脉瘤的诊疗进展[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 2014, 41(5): 453-456.

[9] ACKER G, FEKONJA L, VAJKOCZY P. Surgical management of moyamoya disease[J]. Stroke, 2018, 49(2): 476-482.

[10] 陈远兵, 陈风华, 何芳, 等. 蛛网膜对儿童缺血型烟雾病间接颅内血管重建术疗效的影响[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 2017, 44(1): 5-9.

[11] 梁银华, 陈远兵, 陈风华, 等. 术前匀速补液对烟雾病患者血液流变学的影响[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 2019, 46 (3): 260-262.

[12] 张子晴, 卢燕, 尹世敏. 成人烟雾病治疗的相关研究进展[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 2023, 50(3): 78-83.

- [13] WOUTERS A, SMETS I, VAN DEN NOORTGATE W, et al. Cerebrovascular events after surgery versus conservative therapy for moyamoya disease: a meta-analysis[J]. *Acta Neurol Belg*, 2019, 119(3): 305-313.
- [14] LI QF, GAO YL, XIN WQ, et al. Meta-analysis of prognosis of different treatments for symptomatic moyamoya disease[J]. *World Neurosurg*, 2019, 127: 354-361.
- [15] BERSANO A, KHAN N, FUENTES B, et al. European Stroke Organisation (ESO) guidelines on moyamoya angiopathy endorsed by vascular European reference network (VASCERN) [J]. *Eur Stroke J*, 2023, 8(1): 55-84.
- [16] NOH HJ, KIM SJ, KIM JS, et al. Long term outcome and predictors of ischemic stroke recurrence in adult moyamoya disease[J]. *J Neurol Sci*, 2015, 359(1/2): 381-388.
- [17] YE F, LI JX, WANG TZ, et al. Efficacy and safety of antiplatelet agents for adult patients with ischemic moyamoya disease[J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 608000.
- [18] JANG DK, LEE KS, RHA HK, et al. Bypass surgery versus medical treatment for symptomatic moyamoya disease in adults [J]. *J Neurosurg*, 2017, 127(3): 492-502.
- [19] KIM T, OH CW, KWON OK, et al. Stroke prevention by direct revascularization for patients with adult-onset moyamoya disease presenting with ischemia[J]. *J Neurosurg*, 2016, 124(6): 1788-1793.
- [20] LEE SB, KIM DS, HUH PW, et al. Long-term follow-up results in 142 adult patients with moyamoya disease according to management modality[J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2012, 154(7): 1179-1187.
- [21] ZHENG J, YU LB, DAI KF, et al. Clinical features, surgical treatment, and long-term outcome of a multicenter cohort of pediatric moyamoya[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 14.
- [22] PARRAY T, MARTIN TW, SIDDIQUI S. Moyamoya disease: a review of the disease and anesthetic management[J]. *J Neurosurg Anesthesiol*, 2011, 23(2): 100-109.
- [23] 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 synangiosis[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2019: 1-7.
- [24] LEE KS, ZHANG JJY, BHATE S, et al. Surgical revascularizations for pediatric moyamoya: a systematic review, meta-analysis, and meta-regression analysis[J]. *Childs Nerv Syst*, 2023, 39(5): 1225-1243.

责任编辑:王荣兵