

基于球囊闭塞试验的脑血管侧支循环代偿能力评估及临床意义

孙增峰 尚彦国 盛志国 朱华雨 佟小光

【摘要】 **目的** 通过颈内动脉球囊闭塞试验(BTO)评估 Willis 环前循环和后循环侧支开放情况和代偿能力,以及患者对颈内动脉闭塞耐受能力。**方法** 纳入2016年6月至2021年9月在天津市环湖医院行颈内动脉BTO试验的85例(87侧)患者,BTO试验联合DSA观察前循环和后循环结构完整性、开放比例和代偿能力,对比分析不同组别BTO试验阳性率。**结果** 本组有8侧占9.20%(8/87)BTO试验阳性,前交通动脉缺如、闭塞侧完全胚胎型大脑后动脉、闭塞侧前后循环均不开放患者阳性率分别高于前交通动脉未缺如[3/5对6.10%(5/82);Fisher确切概率法: $P=0.005$]、非完全胚胎型大脑后动脉[3/7对6.25%(5/80);Fisher确切概率法: $P=0.015$]、前循环开放[3/6对6.17%(5/81);Fisher确切概率法: $P=0.009$]和后循环开放[20%(5/25)对0(0/59);Fisher确切概率法: $P=0.002$]患者;仅前循环开放患者阳性率高于前后循环均开放患者[13.04%(3/23)对0(0/3);Fisher确切概率法: $P=0.022$],前后循环均不开放患者亦高于仅前循环开放患者[2/2对13.04%(3/23);Fisher确切概率法: $P=0.033$]和前后循环均开放患者[2/2对0(0/56);Fisher确切概率法: $P=0.001$]。颈内动脉闭塞后,闭塞侧大脑前动脉供血区经单一前循环代偿74侧占88.10%(74/84)、经单一后循环代偿3侧占3.57%(3/84)、经前后循环共同代偿5侧占5.95%(5/84)且均为有效代偿[美国介入和治疗性神经放射学学会/美国介入放射学学会(ASITN/SIR)分级3~4级],前后循环均未代偿2侧占2.38%(2/84,ASITN/SIR分级为零);闭塞侧大脑中动脉供血区经单一前循环代偿23侧占27.38%(23/84)且有效代偿为22.62%(19/84),经单一后循环代偿14侧占16.67%(14/84)、经前后循环共同代偿45侧占53.57%(45/84)且均为有效代偿,前后循环均未代偿2侧占2.38%(2/84,ASITN/SIR分级为零);4种代偿方式对大脑前动脉($\chi^2=53.000, P=0.000$)和大脑中动脉($\chi^2=54.244, P=0.000$)供血区的代偿能力差异有统计学意义,前后循环共同代偿能力高于单一前循环代偿($Z=6.754, P=0.000; Z=6.180, P=0.000$)、单一后循环代偿($Z=2.277, P=0.023; Z=5.065, P=0.000$)和前后循环均未代偿($Z=1.991, P=0.047; Z=2.478, P=0.013$)。 **结论** 大脑前循环开放比例较高且代偿能力较强,而前循环不开放尤其是前交通动脉缺如、闭塞侧完全胚胎型大脑后动脉、闭塞侧前后循环均不开放的患者无法耐受颈内动脉闭塞的风险,术中应注意保护颈内动脉。前后循环共同代偿能力高于单一前循环或后循环代偿,闭塞颈内动脉相对安全。

【关键词】 动脉闭塞性疾病; 颈内动脉; 气囊阻塞; 大脑动脉环; 侧支循环

Clinical significance of cerebral collateral circulation assessment based on Balloon Test Occlusion

SUN Zeng-feng¹, SHANG Yan-guo², SHENG Zhi-guo¹, ZHU Hua-yu¹, TONG Xiao-guang²

¹Grade 2018, Clinical College of Neurology, Neurosurgery and Neurorehabilitation, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China

²Department of Neurosurgery, Tianjin Huanhu Hospital; Tianjin Key Laboratory of Cerebral Vascular and Neurodegenerative Diseases, Tianjin 300350, China

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2022.05.003

基金项目:天津市科技计划项目(项目编号:18ZXDBSY00180)

作者单位:300070 天津医科大学神经内外科及神经康复临床学院2018级(孙增峰,盛志国,朱华雨);300350 天津市环湖医院神经外科 天津市脑血管与神经变性重点实验室(尚彦国,佟小光)

孙增峰与尚彦国对本文有同等贡献

通讯作者:佟小光,Email:tongxg@yahoo.com

SUN Zeng-feng and SHANG Yan-guo contributed equally to the article

Corresponding author: TONG Xiao-guang (Email: tongxg@yahoo.com)

[Abstract] Objective To analyze compensatory ability of the cerebral collateral circulation and relevant factors affecting cerebral ischemic tolerance for internal carotid artery (ICA) occlusion by Balloon Test Occlusion (BTO), providing reference basis for the selection of treatment methods in tumors or complicated aneurysms with ICA involved. **Methods** The clinical data of 87 cases BTO (85 patients, two of whom underwent bilateral BTO) of ICA in Tianjin Huanhu Hospital from June 2016 to September 2021 were analyzed retrospectively. The integrity of anterior or posterior of circulation structure, collateral compensatory capacity, tolerance to ICA occlusion and its influencing factors were analyzed. **Results** There were 8 [9.20% (8/87)] BTO positive cases. The positive rate was of cases with incomplete anterior communicating artery was higher than those with complete anterior communicating artery [3/5 vs. 6.10% (5/82); Fisher's exact probability: $P = 0.005$]. The positive rate of cases with complete fetal posterior cerebral artery (fPCA) which was higher than those without complete fPCA [3/7 vs. 6.25% (5/80); Fisher's exact probability: $P = 0.015$]. The positive rate of cases with non-open anterior circulation which was higher than those cases with open anterior circulation [3/6 vs. 6.17% (5/81); Fisher's exact probability: $P = 0.009$]. The positive rate of cases with non-open posterior circulation which was higher than those cases with open posterior circulation [20% (5/25) vs. 0 (0/59); Fisher's exact probability: $P = 0.002$]. Only the positive rate of patients with anterior circulation opening was higher than that of patients with open anterior circulation and open posterior circulation [13.04% (3/23) vs. 0 (0/3); Fisher's exact probability: $P = 0.022$], neither anterior nor posterior circulation opening were significantly higher than those with only anterior circulation opening [2/2 vs. 13.04% (3/23); Fisher's exact probability: $P = 0.033$] and both anterior and posterior circulation opening [2/2 vs. 0 (0/56); Fisher's exact probability: $P = 0.001$]. Once the ICA occluded, the anterior circulation, the posterior circulation, both of anterior and posterior circulation could provide anterior cerebral artery (ACA) supplied area with compensatory blood flow for 88.10% (74/84), 3.57% (3/84), 5.95% (5/84) cases, respectively. The anterior circulation, the posterior circulation, both anterior and posterior circulation could provide middle cerebral artery (MCA) supplied area with compensatory blood flow for 27.38% (23/84), 16.67% (14/84), 53.57% (45/84) cases, respectively. There were statistically significant differences in the compensatory capacity between ACA ($\chi^2 = 53.000$, $P = 0.000$) and MCA ($\chi^2 = 54.244$, $P = 0.000$). The combined compensatory capacity of both anterior and posterior circulation was higher than that of single anterior circulation ($Z = 6.754$, $P = 0.000$; $Z = 6.180$, $P = 0.000$), single posterior circulation ($Z = 2.277$, $P = 0.023$; $Z = 5.065$, $P = 0.000$) and neither anterior nor posterior circulation ($Z = 1.991$, $P = 0.047$; $Z = 2.478$, $P = 0.013$). **Conclusions** The anterior circle is functionally much more important than the posterior circle. Non-open anterior circulation, especial absence of anterior communicating artery, complete fPCA, neither anterior nor posterior circulation were highly predictive for intolerance to ICA occlusion. For these cases, attention should be paid to the protection of ICA or active blood flow reconstruction technology to reduce the occurrence of cerebral ischemia. Those cases with both opened anterior circulation and opened posterior circulation provided higher compensatory ability than those with single circulation. For those cases, the ICA of could be sacrificed.

[Key words] Arterial occlusive diseases; Carotid artery, internal; Balloon occlusion; Circle of Willis; Collateral circulation

This study was supported by Tianjin Science and Technology Commission Plan (No. 18ZXDBSY00180).

Conflicts of interest: none declared

脑血管侧支循环代偿能力(以下简称脑侧支代偿能力)是累及颈内动脉(ICA)的颅底肿瘤、头颈部肿瘤和颅内复杂动脉瘤制定手术方案时的重要参考依据,决定术中能否安全闭塞颈内动脉,以及无法闭塞颈内动脉时如何选择脑血管重建术式^[1-2]。球囊闭塞试验(BTO)通过临时阻断闭塞侧颈内动脉,模拟术中颈内动脉闭塞后脑血流动力学变化,不仅可以显示各级侧支开放情况和代偿能力,还可以判断患者对颈内动脉闭塞的耐受程度^[3],较传统

的CTA、MRA、灌注成像(PWI)、CT灌注成像(CTP)和经颅多普勒超声(TCD)等检查方法具有明显优势;同时亦可为无法行BTO试验的患者能否耐受颈内动脉闭塞提供参考。本研究对天津市环湖医院近年收治的85例(共87侧)行颈内动脉BTO试验患者的临床资料进行回顾,评估颈内动脉闭塞情况下侧支开放情况(主要是Willis环前循环和后循环)和代偿能力,以为术中颈内动脉保护措施制定或脑血管重建术式的选择提供依据。

对象与方法

一、研究对象

1. 纳入与排除标准 (1)累及颈内动脉的颅底肿瘤、头颈部肿瘤或颅内复杂动脉瘤病例,均行颈内动脉 BTO 试验。(2)全脑血管造影显示颈内动脉轻至中度狭窄(狭窄率 < 70%),允许行 BTO 试验。(3)年龄 ≤ 75 岁。(4)凡存在以下情况者均不纳入本研究范畴:颈内动脉重度狭窄(狭窄率 ≥ 70%)或闭塞而无法耐受 BTO 试验,行椎动脉 BTO 试验者。

2. 一般资料 选择 2016 年 6 月至 2021 年 9 月在我院神经外科行颈内动脉 BTO 试验的患者共 85 例计 87 侧,其中 2 例进行双侧 BTO 试验。男性 27 例(27 侧),女性 58 例(60 侧);年龄 8 ~ 74 岁,平均(49.61 ± 15.64)岁,其中 61 例(62 侧) ≤ 60 岁、24 例(25 侧) > 60 岁;颈内动脉受累者中颅内复杂动脉瘤为 33 例(33 侧)、颅底肿瘤 44 例(46 侧)、鼻咽癌 4 例(4 侧)、颈部肿瘤 4 例(4 侧);行左侧 BTO 试验 41 侧、右侧 BTO 试验 46 例。

二、研究方法

1. 颈内动脉 BTO 试验 患者仰卧位,局部麻醉后先于单侧股动脉置入 5F 动脉鞘(美国 Johnson & Johnson 公司),行双侧颈内动脉、双侧椎动脉和颈外动脉造影以观察脑血管解剖结构和变异;再于对侧股动脉置入 6F 动脉鞘和 6F 导引导管(美国 Medtronic 公司),微导丝导入球囊并置于闭塞侧颈内动脉岩骨段或病变近心端。充盈球囊后经 DSA 确认颈内动脉血流完全阻断,球囊以远不显影,再依次行对侧颈内动脉和椎动脉造影以评估闭塞侧颈内动脉闭塞后前循环和后循环开放情况和代偿能力;球囊充盈维持 30 min,观察患者是否出现意识障碍、感觉和运动神经功能障碍。在球囊充盈过程中,如果出现神经功能障碍提示无法耐受颈内动脉闭塞,即 BTO 试验阳性,则即刻撤出球囊;未出现神经功能障碍者进一步行强化降压试验,当血压下降 20 ~ 30 mm Hg(1 mm Hg = 0.133 kPa)并维持 15 min 时,若出现神经功能障碍亦视为 BTO 试验阳性;试验结束撤出球囊,再次行闭塞侧颈内动脉造影,观察球囊闭塞过程中是否引起血栓形成或血管痉挛。

2. 侧支代偿评估 (1)前循环开放的判断:闭塞侧颈内动脉闭塞后,向对侧颈内动脉注射对比剂,如果闭塞侧大脑前动脉(ACA)或大脑中动脉(MCA)供血区显影,则判断为闭塞侧前循环开放,

其中,大脑前动脉和大脑中动脉供血区均显影为完全开放,大脑前动脉 A1 段缺如而对侧优势大脑前动脉仅供血闭塞侧大脑前动脉,则为部分开放;如果闭塞侧大脑前动脉和大脑中动脉供血区均不显影,则判断为前循环不开放。(2)后循环开放的判断:闭塞侧颈内动脉闭塞后,向椎动脉注射对比剂,如果闭塞侧大脑后动脉(PCA)P1 段和后交通动脉显影且大脑前动脉或大脑中动脉供血区显影,则判断为后循环开放;如果闭塞侧 P1 段或后交通动脉不显影且大脑前动脉和大脑中动脉供血区均不显影,则判断为后循环不开放。(3)代偿能力评估:闭塞侧颈内动脉闭塞后,采用美国介入和治疗性神经放射学学会(ASITN)/美国介入放射学学会(SIR)侧支循环分级^[3]评估前循环和后循环对闭塞侧大脑前动脉和大脑中动脉供血区代偿能力,0 级,无侧支血流灌注至闭塞侧大脑前动脉和大脑中动脉供血区;1 级,有缓慢的侧支血流灌注至闭塞侧大脑前动脉和大脑中动脉供血区,但伴持续低灌注;2 级,有快速的侧支血流灌注至闭塞侧大脑前动脉和大脑中动脉供血区,但仅灌注至部分大脑前动脉和大脑中动脉供血区;3 级,静脉晚期有缓慢但完全的侧支血流灌注至闭塞侧大脑前动脉和大脑中动脉供血区;4 级,动脉期有快速且完全的侧支血流灌注至整个闭塞侧大脑前动脉和大脑中动脉供血区。单一前循环或后循环代偿时,ASITN/SIR 分级 0 级为无法代偿,≥ 1 级为可代偿,其中 3 ~ 4 级为有效代偿;前循环和后循环共同代偿时,ASITN/SIR 分级为二者之和。

3. 统计分析方法 采用 SPSS 22.0 统计软件进行数据处理与分析。计数资料以相对数构成比(%)或率(%)表示,采用校正 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。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 Kruskal-Wallis 检验 (H 检验),两两比较行 Mann-Whitney U 检验。以 $P \leq 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

本研究 85 例患者中 77 例(90.59%)前循环(双侧 A1 段和前交通动脉)结构完整,3 例(3.53%)单侧 A1 段缺如(闭塞侧 2 例、对侧 1 例),5 例(5.88%)前交通动脉缺如;另有 7 例(8.24%)为完全胚胎型大脑后动脉(闭塞侧 2 例、对侧 5 例)。

BTO 试验显示,87 侧中 81 侧(93.10%)闭塞侧前循环开放,包括完全开放 79 侧、部分开放 2 侧,其余

表 1 不同组别患者 BTO 试验阳性率的比较[例(%)]**Table 1.** Comparison of the BTO positive rate among different types of patients [case (%)]

组别	侧别数	BTO 试验阳性	校正 χ^2 值	P 值
性别			0.000	1.000
男性	27	2(7.41)		
女性	60	6(10.00)		
年龄			0.027	0.869
≤60 岁	62	5(8.06)		
>60 岁	25	3(12.00)		
闭塞侧别			0.040	0.841
左侧	41	3(7.32)		
右侧	46	5(10.87)		
闭塞侧 A1 段缺如			—	0.176
是	2	1(1/2)		
否	85	7(8.24)		
对侧 A1 段缺如			—	1.000
是	1	0(0/1)		
否	86	8(9.30)		
前交通动脉缺如			—	0.005
是	5	3(3/5)		
否	82	5(6.10)		
闭塞侧完全 fPCA			—	0.015
是	7	3(3/7)		
否	80	5(6.25)		
闭塞侧前循环开放			—	0.009
是	81	5(6.17)		
否	6	3(3/6)		
闭塞侧后循环开放			—	0.002
是	59	0(0.00)		
否	25	5(20.00)		

—, Fisher's exact probability, Fisher 确切概率法。BTO, Balloon Test Occlusion, 球囊闭塞试验; fPCA, fetal posterior cerebral artery, 胚胎型大脑后动脉

表 2 不同类型侧支循环组患者 BTO 试验阳性率的比较*(例)**Table 2.** Comparison of the BTO positive rate among different types of collateral circulation* (case)

组别	侧别数	BTO 试验阳性
前循环开放	23	3(3/23)
后循环开放	3	0(0/ 3)
均开放	56	0(0/56)
均不开放	2	2(2/ 2)

*Fisher's exact probability, Fisher 确切概率法; $\chi^2 = 18.145$, $P = 0.000$ 。BTO, Balloon Test Occlusion, 球囊闭塞试验

试验,其余 84 侧完成后循环评估的患者中 59 例(70.24%)后循环开放、25 侧(29.76%)后循环不开放。对均完成前后循环评估的 84 侧进行侧支循环分类,前循环开放 23 侧(27.38%)、后循环开放 3 侧(3.57%),前后循环均开放 56 侧(66.67%)、前后循环均不开放 2 侧(2.38%)。BTO 试验呈阳性者 8 例,阳性率约为 9.20%(8/87),不同组别阳性率比较,前交通动脉缺如高于未缺如($P = 0.005$)、完全胚胎型大脑后动脉高于非完全胚胎型($P = 0.015$)、前循环不开放高于前循环开放($P = 0.009$)、后循环不开放高于后循环开放($P = 0.002$),而不同性别、年龄、闭塞侧别、闭塞侧和对侧 A1 段缺如患者 BTO 试验阳性率差异无统计学意义(均 $P > 0.05$, 表 1);不同类型侧支代偿能力评估,仅前循环开放、仅后循环开放、前后循环均开放与前后循环均不开放患者 BTO 试验阳性率差异具有统计学意义(Fisher 确切概率法: $P = 0.000$, 表 2),其中仅前循环开放患者高于前后循环均开放患者(Fisher 确切概率法: $P = 0.022$),前后循环均不开放患者亦高于仅前循环开放(Fisher 确切概率法: $P = 0.033$)和前后循环均开放患者(Fisher 确切概率法: $P = 0.001$)。

颈内动脉闭塞后,闭塞侧大脑前动脉供血区经单一前循环代偿 74 侧占 88.09%(74/84),ASITN/SIR 分级 3~4 级(均为有效代偿),中位分级 4(4,4)级;经单一后循环代偿 3 侧占 3.57%(3/84),ASITN/SIR 分级 3~4 级(均为有效代偿),中位分级 4(3,4)级;经前循环和后循环共同代偿 5 侧占 5.95%(5/84),ASITN/SIR 分级之和为 5~7 级(均为有效代偿),中位分级 6(5,7)级;前后循环均未代偿 2 侧占 2.38%(2/84),ASITN/SIR 分级为零。上述 4 种代偿方式 ASITN/SIR 分级差异具有统计学意义($P = 0.000$, 表 3),其中,前后循环共同代偿组 ASITN/SIR 分级高于单一前循环代偿组($P = 0.000$)、单一后循环代偿组($P = 0.023$)和前后循环均未代偿组($P = 0.047$),且单一前循环代偿组亦高于前后循环均未代偿组($P = 0.000$, 表 4)。闭塞侧大脑中动脉供血区经单一前循环代偿 23 侧占 27.38%(23/84),ASITN/SIR 分级 1~4 级[其中有效代偿占 22.62%(19/84)],中位分级 4(3,4)级;经单一后循环代偿 14 侧占 16.67%(14/84),ASITN/SIR 分级 3~4 级(均为有效代偿),中位分级 4(3,4)级;经前后循环共同代偿 45 侧占 53.57%(45/84),ASITN/SIR 分级之和为 3~8 级(均为有效代偿),中位分级 6(5,6)级;前后循环均未代

6 侧(6.90%)前循环不开放;有 3 侧颈内动脉闭塞后出现神经功能障碍,仅完成前循环评估即提前终止

表 3 颈内动脉闭塞后前循环与后循环代偿能力的比较 [M(P₂₅, P₇₅), 级]

Table 3. Comparison of ability of the collateral compensative capacity between anterior circulation and posterior circulation [M (P₂₅, P₇₅), grade]

组别	侧别数	ASITN/SIR 分级	χ ² 值	P 值
大脑前动脉供血区			53.000	0.000
前循环代偿(1)	74	4(4,4)		
后循环代偿(2)	3	4(3,4)		
共同代偿(3)	5	6(5,7)		
均未代偿(4)	2	0(0,0)		
大脑中动脉供血区			54.244	0.000
前循环代偿(1)	23	4(3,4)		
后循环代偿(2)	14	4(3,4)		
共同代偿(3)	45	6(5,6)		
均未代偿(4)	2	0(0,0)		

ASITN, American Society of Interventional and Therapeutic Neuroradiology, 美国介入和治疗性神经放射学学会; SIR, Society of Interventional Radiology, 美国介入放射学学会

表 4 颈内动脉闭塞后前循环与后循环代偿能力的两两比较

Table 4. Pairwise comparison of ability of the collateral compensative capacity between anterior circulation and posterior circulation

组间两两比	大脑前动脉供血区		大脑中动脉供血区	
	Z 值	P 值	Z 值	P 值
(1):(2)	1.912	0.056	1.165	0.244
(1):(3)	6.754	0.000	6.180	0.000
(1):(4)	5.137	0.000	2.506	0.012
(2):(3)	2.277	0.023	5.065	0.000
(2):(4)	1.826	0.068	2.582	0.010
(3):(4)	1.991	0.047	2.478	0.013

偿 2 侧占 2.38% (2/84), ASITN/SIR 分级为零。4 种代偿方式 ASITN/SIR 分级差异具有统计学意义 ($P = 0.000$, 表 3), 其中, 前后循环共同代偿组 ASITN/SIR 分级高于单一前循环代偿组 ($P = 0.000$)、单一后循环代偿组 ($P = 0.012$) 和前后循环均未代偿组 ($P = 0.013$), 单一前循环代偿组 ($P = 0.012$) 和单一后循环代偿组 ($P = 0.010$) 亦高于前后循环均未代偿组 (表 4)。

讨 论

脑侧支代偿系指供血动脉重度狭窄或闭塞时, 血流经其他血管到达缺血脑组织以获得不同程度的灌注代偿^[4], 共分为 3 级, 对于急性颈内动脉闭塞, 以解剖结构和功能完整的一级侧支循环 Willis

环在侧支代偿中的作用最为重要, 而二级侧支循环 (眼动脉回流和软脑膜吻合) 和三级侧支循环 (颅内新生血管) 的作用则相对有限^[5-6]。故明确一级侧支循环的开放情况和代偿能力具有重要临床意义。

作为头部无创性检测方法中的 CTA 和 MRA 等, 虽可显示 Willis 环全貌, 但与 Willis 环的实际解剖结构仍存一定误差, 尤其对后循环的显影率更差^[7], 且无法预测颈内动脉闭塞后 Willis 环的代偿能力。BTO 试验可通过模拟术中急性颈内动脉闭塞后的脑血流动力学改变, 评估 Willis 环等各级侧支循环的开放情况和代偿能力, 以及患者对颈内动脉闭塞的实际耐受能力。对于可耐受 BTO 试验的患者, 术中直接闭塞颈内动脉; 而无法耐受者则需依据其代偿能力选择高流量或低流量搭桥术, 以降低术后缺血性卒中的风险^[8-10]。

Willis 环解剖结构完整性是脑侧支代偿的基础, 但是解剖学上有 11%~18% 的 Willis 环前循环缺如或发育不良, 30%~32% 的后循环缺如或发育不良^[5,11]; 影像学上 Willis 环不完整比例高达 50%~79%^[12-15]。一项国人 Willis 环的 CTA 研究显示, 前循环结构完整比例为 79%, 后循环为 31%^[16]。本研究全脑血管造影联合 BTO 试验显示, 解剖结构上, 前循环结构完整比例达 90.59% (77/85), A1 段缺如比例为 3.53% (3/85), 前交通动脉缺如比例为 5.88% (5/85); 功能上, 闭塞侧前循环开放 (包括完全开放和部分开放) 比例高达 93.10% (81/87), 闭塞侧后循环开放比例为 70.24% (59/84), 表明 Willis 环前循环结构完整和前循环开放比例较高, 与既往研究结果相一致^[7]。进一步分析 Willis 环前循环和后循环的代偿能力, 单一前循环可以作为 88.10% (74/84) 大脑前动脉供血区的代偿且均为有效代偿 (ASITN/SIR 分级 3~4 级), 27.38% (23/84) 大脑中动脉供血区的代偿且有效代偿为 22.62% (19/84); 单一后循环可作为 3.57% (3/84) 大脑前动脉供血区和 16.67% (14/84) 大脑中动脉供血区的代偿且均为有效代偿; 前后循环共同代偿可作为 5.95% (5/84) 大脑前动脉供血区和 53.57% (45/84) 大脑中动脉供血区的代偿且均为有效代偿。由此可见, 无论是大脑前动脉还是大脑中动脉供血区, 前后循环共同代偿的代偿能力均高于单一前循环和单一后循环代偿, 此类患者可安全闭塞病变侧颈内动脉而不发生脑缺血。

BTO 试验的重要意义在于筛选出无法耐受颈

内动脉闭塞的病例,并为其制定稳妥的术中颈内动脉保护措施或选择合理的脑血管重建术式,从而避免缺血性卒中的发生。本组病例无法耐受颈内动脉闭塞的比例即 BTO 试验阳性率为 9.20% (8/87),与文献报道的 10%~15% 相近^[8,17]。根据既往文献报道,有 17%~30% 的患者因未行 BTO 试验而直接永久性闭塞颈内动脉最终发生缺血性卒中^[18-19]。故对于累及颈内动脉的颅底肿瘤或颅内复杂动脉瘤患者,BTO 试验是不可或缺的,但对于因各种原因无法行 BTO 试验的患者,如何判断其耐受颈内动脉闭塞的能力是制定手术方案的难点和重点。本研究结果提示,闭塞侧前循环不开放患者 BTO 试验阳性率高于前循环开放患者,其中仅前交通动脉缺如患者阳性率高于前交通动脉未缺如患者,而 A1 段作为前循环的组成部分,其是否缺如和缺如侧别均不影响 BTO 试验阳性率,可能是由于闭塞侧 A1 段缺如时多伴有对侧优势大脑前动脉可提供部分代偿,尚待进一步探究。针对缺血性脑血管病的研究显示,前交通动脉缺如或发育不良是颈内动脉闭塞后发生缺血性卒中的危险因素^[20];前交通动脉对降低脑血管搭桥术后缺血性卒中发生率至关重要^[21]。然而,对于后循环的代偿作用,不同研究结果存在较大差异。黎劭学等^[22]认为,后循环并非颈内动脉闭塞后的主要代偿途径,其开放情况和代偿能力不影响 BTO 试验结果;Yang 等^[23]发现,后循环不开放患者 BTO 试验阳性率更高;Simonato 等^[24]的研究显示,伴后交通动脉发育不全的颈内动脉交通段动脉瘤患者在血管内栓塞治疗后,脑梗死发生率高于不伴后交通动脉发育不全患者。本研究后循环不开放患者 BTO 试验阳性率高于后循环开放患者,但考虑到后循环不开放比例高达 29.76% (25/84),故其临床价值不如前循环;且后循环开放患者 BTO 试验阳性率为零,均可耐受颈内动脉闭塞,表明后循环是颈内动脉闭塞后的重要保护机制。针对缺血性脑血管病的研究也显示,后循环开放是降低缺血性卒中发生率的重要保护因素^[25-26]。本研究前后循环均不开放患者 BTO 试验均呈阳性,提示在急性颈内动脉闭塞患者中,一级侧支循环是脑侧支代偿的基础,二级和三级侧支循环在闭塞早期无法提供有效代偿,例如,单纯软脑膜动脉不足以代偿颈内动脉闭塞后的脑组织缺血^[6]。本研究闭塞侧完全胚胎型大脑后动脉患者 BTO 试验阳性率高于非完全胚胎型患者,推测可能与完全胚胎型大脑后动脉患者

P1 段缺如导致后循环不开放有关。因此,对于累及颈内动脉的颅底肿瘤、头面部肿瘤或颅内复杂动脉瘤患者,无法行 BTO 试验时,如果 CTA、MRA 或 DSA 发现其存在前交通动脉缺如、闭塞侧完全胚胎型大脑后动脉、前后循环结构不完整,则提示患者无法耐受颈内动脉闭塞的风险较高,应尽可能采取稳妥的术中颈内动脉保护措施或选择合理的脑血管重建术式,以避免缺血性卒中的发生;如果常规影像学检查提示闭塞侧后循环结构完整,则患者无法耐受颈内动脉闭塞的风险相对较低。

综上所述,有超过 90% 的患者单侧前循环开放且代偿能力较高,而前循环不开放尤其是前交通动脉缺如、闭塞侧完全胚胎型大脑后动脉、闭塞侧前后循环均不开放的患者,均无法耐受颈内动脉闭塞,对于上述 3 类患者术中应注意保护颈内动脉,必要时可行脑血管重建术以降低缺血性卒中的发生。与前循环不同,单侧后循环开放的比例较低,但只要闭塞侧后循环开放其耐受颈内动脉闭塞的能力即增强。但本研究为单中心研究且样本量较小,特别是 BTO 试验阳性率较低导致无法耐受颈内动脉闭塞的病例数较少,故无法行 Logistic 回归分析筛查相关影响因素,后续尚待扩大样本量、采用 Logistic 回归分析进一步筛查脑侧支代偿能力的影响因素。

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] Tong XG, Wang X. Cerebral revascularization for anterior cerebral artery applied in surgery of the complex anterior communicating artery aneurysms [J]. Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi, 2021, 21:527-531. [佟小光, 王轩. 大脑前动脉搭桥术在复杂前交通动脉瘤中的应用 [J]. 中国现代神经疾病杂志, 2021, 21:527-531.]
- [2] Sun ZF, Shi MG, Shang YG, Tong XG. Application analysis of cerebral revascularization in the treatment of skull base tumors involving internal carotid artery [J]. Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi, 2021, 37:1108-1113. [孙增峰, 施铭岗, 尚彦国, 佟小光. 血流重建在累及颈内动脉的颅底肿瘤治疗中的应用分析 [J]. 中华神经外科杂志, 2021, 37:1108-1113.]
- [3] Serbinenko FA. Balloon catheterization and occlusion of major cerebral vessels: 1994 [J]. J Neurosurg, 2007, 107:684-705.
- [4] Sun Y, Wang BL, Li Q, Tong XG. Clinical analysis of low flow bypass in the treatment of chronic symptomatic middle cerebral artery occlusion [J]. Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi, 2021, 21:547-552. [孙杨, 王本琳, 李琪, 佟小光. 低流量血管搭桥术治疗慢性症状性大脑中动脉闭塞疗效分析 [J]. 中国现代神经疾病杂志, 2021, 21:547-552.]
- [5] Liebeskind DS. Collateral circulation [J]. Stroke, 2003, 34:2279-2284.
- [6] Liebeskind DS, Cotsonis GA, Saver JL, Lynn MJ, Cloft HJ, Chimowitz MI; Warfarin - Aspirin Symptomatic Intracranial Disease (WASID) Investigators. Collateral circulation in

- symptomatic intracranial atherosclerosis[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2011, 31:1293-1301.
- [7] Wang YL, Luo L. Comparative study on the morphology of Willis circle in three imaging methods[J]. *Chongqing Yi Xue*, 2019, 48:2660-2663.[王云玲, 罗琳. 3种成像方法中Willis环的形态对比研究[J]. *重庆医学*, 2019, 48:2660-2663.]
- [8] Linskey ME, Jungreis CA, Yonas H, Hirsch WL Jr, Sekhar LN, Horton JA, Janosky JE. Stroke risk after abrupt internal carotid artery sacrifice: accuracy of preoperative assessment with balloon test occlusion and stable xenon-enhanced CT[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 1994, 15:829-843.
- [9] Shi HZ, Zheng BJ. Bypass for complex anterior circulation aneurysms[J]. *Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi*, 2021, 21:532-536.[史怀璋, 郑秉杰. 血管搭桥术在复杂前循环动脉瘤中的应用[J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2021, 21:532-536.]
- [10] Tong XG. Therapeutic effectiveness of bypass and trapping treatment for complex intracranial aneurysms[J]. *Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi*, 2012, 12:26-31.[佟小光. 颅内复杂动脉瘤搭桥孤立术疗效观察[J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2012, 12:26-31.]
- [11] Rhoton AL Jr. The supratentorial arteries[J]. *Neurosurgery*, 2002, 51(4 Suppl):S53-120.
- [12] Liang F, Fukasaku K, Liu H, Takagi S. A computational model study of the influence of the anatomy of the circle of willis on cerebral hyperperfusion following carotid artery surgery[J]. *Biomed Eng Online*, 2011, 10:84.
- [13] Moore S, David T. A model of autoregulated blood flow in the cerebral vasculature[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2008, 222:513-530.
- [14] Shatri J, Bexheti S, Shatri M, Kabashi A, Mucaj S. Anatomical variations in the circulus arteriosus cerebri with clinical importance: results of an magnetic resonance angiography study and review of literature[J]. *J Clin Imaging Sci*, 2021, 11:8.
- [15] van Ooij P, Zwanenburg JJ, Visser F, Majoie CB, vanBavel E, Hendrikse J, Nederveen AJ. Quantification and visualization of flow in the Circle of Willis: time-resolved three-dimensional phase contrast MRI at 7 T compared with 3 T[J]. *Magn Reson Med*, 2013, 69:868-876.
- [16] Li Q, Li J, Lv F, Li K, Luo T, Xie P. A multidetector CT angiography study of variations in the circle of Willis in a Chinese population[J]. *J Clin Neurosci*, 2011, 18:379-383.
- [17] Michel E, Liu H, Remley KB, Martin AJ, Madison MT, Kucharczyk J, Truwit CL. Perfusion MR neuroimaging in patients undergoing balloon test occlusion of the internal carotid artery[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2001, 22:1590-1596.
- [18] Moore O, Baker HW. Carotid-artery ligation in surgery of the head and neck[J]. *Cancer*, 1955, 8:712-726.
- [19] Norlen G, Falconer M, Jefferson G, Johnson R. The pathology, diagnosis and treatment of intracranial saccular aneurysms[J]. *Proc R Soc Med*, 1952, 45:291-302.
- [20] Nishijima Y, Akamatsu Y, Weinstein PR, Liu J. Collaterals: implications in cerebral ischemic diseases and therapeutic interventions[J]. *Brain Res*, 2015, 1623:18-29.
- [21] Morinaga Y, Nii K, Sakamoto K, Inoue R, Mitsutake T, Hanada H. Presence of an anterior communicating artery as a prognostic factor in revascularization for anterior circulation acute ischemic stroke[J]. *World Neurosurg*, 2019, 128:e660-663.
- [22] Li SX, Chen JH, Zhang YT, Zou ZM, Li YB, Liu SW, Cai J, Chen RC, Bai XX. Role of balloon occlusion test in the treatment of permanent internal carotid artery occlusion[J]. *Ju Jie Shou Shu Xue Za Zhi*, 2016, 25:603-605.[黎劭学, 陈锦华, 张燕婷, 邹志敏, 李颖彬, 刘诗万, 蔡军, 陈锐聪, 白小欣. 球囊闭塞试验在颈内动脉永久闭塞术决策中的参考作用[J]. *局解手术学杂志*, 2016, 25:603-605.]
- [23] Yang R, Wu H, Chen B, Sun W, Hu X, Wang T, Guo Y, Qiu Y, Dai J. Balloon test occlusion of internal carotid artery in recurrent nasopharyngeal carcinoma before endoscopic nasopharyngectomy: a single center experience[J]. *Front Oncol*, 2021, 11:674889.
- [24] Simonato D, Gargalas S, Cox PJ, Young V, Corkill R, Kuker W, Fuschi M, Houdart E, Labeyrie MA. Aneurysms of the communicating segment of the internal carotid artery with posterior communicating artery agenesis are associated with perforator infarction after embolization[J]. *J Neurointerv Surg*, 2021, 13:347-352.
- [25] Chuang YM, Liu CY, Pan PJ, Lin CP. Posterior communicating artery hypoplasia as a risk factor for acute ischemic stroke in the absence of carotid artery occlusion[J]. *J Clin Neurosci*, 2008, 15:1376-1381.
- [26] Friedrich B, Kempf F, Boeckh-Behrens T, Fischer J, Lehm M, Bernd M, Wunderlich S, Mönch S, Zimmer C, Maegerlein C. Presence of the posterior communicating artery contributes to the clinical outcome after endovascular treatment of patients with MCA occlusions[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2018, 41:1917-1924.

(收稿日期:2022-05-21)

(本文编辑:彭一帆)

下期内容预告 本刊2022年第6期报道专题为脑静脉系统疾病,重点内容包括:急性或亚急性脑静脉窦血栓形成血管内治疗现状;脑静脉系统疾病与脑血流自动调节能力研究进展;炎症与重症脑静脉血栓关系研究进展;脑小静脉与脑结构变化相关性研究进展;脑静脉窦血栓形成MRI血栓信号特征与血管内治疗开通率相关性研究;高分辨率磁共振黑血成像辅助下联合抗凝与血管内治疗对亚急性和慢性脑静脉窦血栓形成疗效分析;橄榄头技术在脑静脉窦狭窄支架植入术中的应用;青年恶性高颅压综合征诊治思考一例;脑静脉窦血栓形成合并低颅压综合征病因分析及诊治思考一例;急性直窦血栓形成血管内治疗一例;脑出血的罪魁祸首;*MTHFR*和*PDGFB*基因突变同时存在