



电子、语音版

·综述·

前交通动脉瘤形态学与血流动力学研究进展

汤文翔^{1,2}, 赵洋洋^{1,2}, 杨少春^{1,2}

1. 赣南医学院第一附属医院神经外科, 江西赣州 341000
2. 赣南医学院心脑血管疾病防治教育部重点实验室, 江西赣州 341000

摘要:前交通动脉瘤是颅内动脉瘤中最常见的类型,一旦破裂,往往症状剧烈,预后不良。近年来,随着影像三维重建技术的发展和计算流体力学的兴起,前交通动脉瘤起始、发展、破裂过程中相关形态学特征及异常血流动力学变化逐渐被揭示。研究表明,前交通动脉瘤的最大径、纵横比、大小比等特征有助于预测破裂风险,大脑前动脉一侧 A1 段发育不良以及 A1 段、A2 段夹角与前交通动脉瘤的发生发展有关,血流动力学改变在动脉瘤形成和破裂中起重要作用。该文对前交通动脉瘤形态学特征和异常血流动力学变化之间的联系进行综述,探讨两者之间相互作用的内在机制,为前交通动脉瘤的早期防治提供依据以及新的思路。

[国际神经病学神经外科学杂志, 2023, 50(2): 91-96]

关键词:前交通动脉瘤;形态学;血流动力学

中图分类号:R743

DOI:10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2023.02.019

Research advances in the morphology and hemodynamics of anterior communicating artery aneurysm

TANG Wenxiang^{1,2}, ZHAO Yangyang^{1,2}, YANG Shaochun^{1,2}

1. The First Clinical School of Ganan Medical College, Ganzhou, Jiangxi 341000, China
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Prevention and Treatment of Cardiovascular and Cerebrovascular Diseases, Gannan Medical University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

Corresponding author: YANG Shaochun, Postgraduate supervisor, Chief physician, Associate professor, Mainly engaged in the research of minimally invasive interventional treatment of intracranial aneurysm, Vascular malformation and other cerebrovascular diseases, Email: yangshch680709@hotmail.com

Abstract: Anterior communicating artery aneurysm is the most common type of intracranial aneurysm, and once ruptured, it often leads to severe symptoms and poor prognosis. In recent years, with the development of three-dimensional imaging reconstruction and the emergence of computational fluid dynamics, related studies have gradually revealed the morphological features and abnormal hemodynamic changes during the formation, progression, and rupture of anterior communicating artery aneurysm. Studies have shown that characteristics such as the maximum diameter, aspect ratio, and size ratio of anterior communicating artery aneurysm can help to predict the risk of rupture, and dysplasia of the A1 segment on one side of the anterior cerebral artery and the angle between the A1 and A2 segments of the anterior cerebral artery are associated with the development and progression of anterior communicating artery aneurysm; in addition, hemodynamic changes also play an important role in the formation and rupture of aneurysm. This article reviews the relationship between morphological characteristics and abnormal hemodynamic changes of anterior communicating artery aneurysm and discusses the internal mechanism of such interaction, so as to provide a basis and new ideas for the early prevention and treatment of ante-

收稿日期:2022-03-08;修回日期:2023-03-29

作者简介:汤文翔(1997—),男,住院医师,在读硕士研究生,主要从事脑血管疾病诊治及综合治疗研究,Email: tangwenxiang1213@163.com。

通信作者:杨少春(1968—),男,研究生导师,主任医师,副教授,主要从事颅内动脉瘤、血管畸形等脑血管病的微创介入治疗研究,Email: yangshch680709@hotmail.com。

rior communicating artery aneurysm. [Journal of International Neurology and Neurosurgery, 2023, 50(2): 91–96]

Keywords: anterior communicating artery aneurysm; morphology; hemodynamics

颅内动脉瘤(intracranial aneurysm, IA)是一种因血管壁变薄而局限向外凸起为特征的常见脑血管疾病。有文献报道,其在一般人群中的发病率为3.2%,有20%~30%的患者为多发IA^[1]。IA好发于大脑动脉分叉处,以前交通动脉瘤最常见,前交通动脉瘤一旦破裂,所导致的动脉瘤性蛛网膜下腔出血后早期再出血率较高^[2],病死率可达73.3%^[3]。并且约22.2%前交通动脉瘤患者动脉瘤破裂后出现不同程度的认知功能障碍,影响预后^[4]。近年来,因影像技术的飞速发展以及计算流体力学在临床研究中的广泛应用,前交通动脉瘤的形态学特征和血流动力学改变在评估动脉瘤发生、增长及破裂过程中的作用逐渐引起人们的关注^[5-7]。但两者内在联系及机制尚未阐明,目前仍存在争议。结合文献,现将前交通动脉瘤形态学特征和血流动力学变化综述如下。

1 前交通动脉瘤形态学

1.1 最大径

定义为动脉瘤颈(动脉瘤根部起始处,沿载瘤动脉血管壁走行连线)中点到动脉瘤顶端最远距离。通常认为,动脉瘤大小与其破裂风险存在相关性。根据未破裂颅内动脉瘤国际研究(ISUIA)一项回顾性研究表明^[8],最大径 ≥ 10 mm的IA患者年破裂率为1.0%,为 < 10 mm IA患者的20倍,最大径较小的IA破裂风险较低,动脉瘤的大小是无蛛网膜下腔出血(SAH)病史的IA患者破裂的重要预测因素。但此后发表的多项研究表明,多数未破裂IA患者,其IA大小 < 7 mm,并且最大径 < 5 mm的前交通动脉瘤患者同样具有较大的破裂风险^[9-11]。因此,前交通动脉瘤可能拥有比其他位置动脉瘤更小的破裂阈值。此外,一项单中心前瞻性研究^[12]证实,动脉瘤直径 ≥ 7 mm的患者破裂风险显著增高,并且当它位于前交通动脉时,破裂风险还将再次升高。所以,将大小作为唯一预测前交通动脉瘤破裂风险因素并不可靠。

1.2 纵横比

近年来,随着人们对前交通动脉瘤形态研究的深入,纵横比(aspect ratio, AR)被认为是一个具有良好临床应用前景预测动脉瘤破裂的指标^[5,13]。Wang等^[13]通过纳入了361名前交通动脉瘤患者发现,AR > 1.19 是前交通动脉瘤破裂的危险因素之一。而在Zheng等^[10]的研究中,破裂的前交通动脉瘤AR平均值为 1.59 ± 0.61 。关于前交通动脉瘤AR破裂阈值目前尚无统一结论,一般认为,过高AR与动脉瘤破裂显著相关。更大的AR值意味着破裂的前交通动脉瘤拥有相对狭窄的瘤颈,在血液流动加快时,会产生“瓶颈效应”,从而导致血液停滞在瘤体内,局部血流动力学发生改变。长期壁面切应力(wall shear stress,

WSS)的显著降低使得局部的内皮细胞功能障碍^[14],最后促使动脉瘤的破裂。因此,更高的AR值往往反映了更大的破裂风险。

1.3 大小比

一项纳入112名前交通动脉瘤患者的单中心研究结果显示^[15],未破裂组的尺寸比(size ratio, SR),定义为动脉瘤最大高度与载瘤动脉平均直径的比值,明显小于破裂组,SR与动脉瘤破裂存在相关性。Xu等^[16]也发现SR与最大径 ≤ 3 mm破裂的前交通动脉瘤相关,这意味着SR对较小的前交通动脉瘤破裂具有重要预测价值。事实上,SR不仅反映动脉瘤与载瘤动脉的关系,更反映了局部的血流动力学特点。较大的SR值导致了动脉瘤呈现多个涡流以及更为复杂的血流流动模式,随着SR的增加,暴露于低WSS的动脉瘤腔内面积增加,最终促使动脉瘤破裂。而Futami^[17]则认为,当SR ≥ 2.1 的动脉瘤更有可能表现出集中的流入射流模式,导致动脉瘤壁上的剪切应力增加,进一步促使动脉瘤发生破裂。

1.4 大脑前动脉A1段发育不全

前交通动脉(anterior communicating artery, ACoA)是前交通复合体重要的结构。它包括双侧的大脑前动脉A1段、A2段以及ACoA。ACoA是大脑动脉前循环重要的沟通桥梁,它对两侧大脑动脉血流调节平衡发挥着关键作用。临床上常发现许多前交通动脉瘤患者大脑前动脉A1段并不对称,通常表现为一侧A1段较对侧粗大,而对侧A1段纤细,甚至缺如,如图1,这可能是由于先天发育等因素所导致的。大量的临床研究证实^[18-20],这种形态学的特点与前交通动脉瘤的发生发展、破裂及预后具有相关性。Zhang等^[21]证实A1段发育不全与ACoA动脉瘤存在相关,他们纳入了504例前交通动脉瘤患者和201例其他位置的动脉瘤患者,分析发现,38.9%的前交通动脉瘤患者存在发育不全的A1段,而在其他地方的动脉瘤患者中,这一比例仅为6.5%。其机制可能是由于不对称的形态学特点导致了前交通动脉瘤局部的血流动力学改变,优势侧A1段高流量血流通过ACoA代偿到对侧,并且在血管弹性作用下,亦有少量非优势A1血流流向对侧,两股流向相反的血流在ACoA局部发生涡流,甚至湍流,损伤血管内皮,启动细胞炎症反应途径,血管壁发生重塑。在反复的损伤和重塑下,最终形成前交通动脉瘤。Rinaldo等^[19]通过对204例前交通动脉瘤患者造影资料进行回顾性分析发现,A1段发育不全的患者动脉瘤直径更大。并且,在没有吸烟、高血压等传统危险因素作用下,单纯的一侧大脑前动脉瘤A1段发育不全所导致的血流动力学改变也能促使动脉瘤的形成。而关于A1段发育

不良是否能影响前交通动脉瘤破裂目前仍存争议,有待进一步研究证实。Chen等^[18]认为,优势A1段的存在与前交通动脉瘤破裂相关($OR: 2.26, 95\%CI: 1.22\sim 4.18, P=$

0.01),而Zhang等^[22]则发表了不同的结论,他们认为优势A1段仅与动脉瘤的存在有关,而与其直径、破裂状态无关。



图1 CTA表现为一侧大脑前动脉A1优势型前交通动脉瘤

1.5 大脑前动脉A1段与A2段夹角

Kasuya等^[23]最先发现,前交通动脉瘤与前交通动脉复合体上A1-A2夹角交界处较小角度有关。前交通复合体A1、A2关系见图2。国内学者Ye等^[24]在此基础上进一步探究双侧A1-A2夹角在前交通动脉瘤发生、破裂中的作用,通过纳入251例IA患者(其中前交通动脉瘤患者64例,其他位置动脉瘤患者187例)研究发现A1-A2角较小且双侧角差较大可增加前交通动脉瘤的发生率,A1-A2角及其差值有助于预测前交通动脉瘤的发生。Gao等^[25]应用计算流体力学技术分析后认为,较小的大脑前动脉分叉角度使血流冲击中心及相邻的加速区的血流动力学应力升高。为适应这种异常增强的血流动力学应力,血管壁发生动脉瘤的改变。正常生理情况下,脑血管分叉部的角度和血管半径受最优化原理控制,即最小做功,实现稳定的血液流动,同时又可可将分叉处的能量损失降至最低,以防止血流动力学应力异常增加。Zhang等^[26]发现前交通动脉瘤患者A1-A2分叉角小于符合最优原则的分叉角度。与正常生理情况不同,前交通动脉瘤患者大脑前动脉不遵循最优化原则,所导致的结果便是局部血液的能量损失增大与做功的增加,分叉部血管壁因此承受了更大的血流动力学应力,进一步损伤血管壁,最终促使动脉瘤形成。

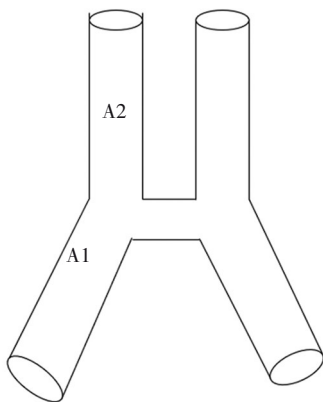


图2 前交通复合体A1-A2关系示意图

1.6 其他形态学特征

Willis环的其他解剖变异也与前交通动脉瘤形成与破裂息息相关^[27]。既往研究认为,开窗畸形与动脉瘤的形成有关,但Krystkiewicz等^[28]通过对333例大脑标本解剖发现,开窗畸形与动脉瘤的存在无因果关系。近来研究发现,更为曲折的大脑前动脉可能是前交通动脉瘤的保护性因素^[29]。此外,尚有前交通动脉瘤与A1、A2角度、入射角度等形态学特征有待更多深入研究。

2 血流动力学

在研究IA发生、破裂机制过程中,人们注意到,单一形态学因素逐渐不能满足研究的需要,因为它无法反映动脉瘤内在血流发生的变化。为了了解IA局部血流的流动状态以及血流与血管壁之间的相互作用,人们将研究方向转向血流动力学。其中,应用最为广泛的就是计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)。近年来,基于CFD以及影像学资料的三维重建技术用来研究IA的血流动力学的可靠性、真实性已在临床应用中得到初步证实。越来越多证据表明,血流动力学改变与IA的起始、生长、破裂过程密不可分^[6,30-31]。

2.1 WSS

Ferguson和Roach等^[32-33]最早提出IA内部的体外流动模型,并发现动脉瘤内的湍流现象,湍流的出现导致血管弹性层的退化以及动脉瘤壁的变薄。在Ferguson等研究基础上,人们提出了WSS的概念,即血管内流动的血流对局部血管壁上施加的切面摩擦力。WSS是目前公认的影响IA发生、发展、破裂的重要的血流的动力学参数,但关于WSS如何影响IA病理过程现尚存争议。1个心动周期内前交通动脉瘤上WSS的变化见图3。

2.1.1 高WSS 一般认为,高WSS与IA的起始、生长有关^[25,34-35]。WSS大小主要取决于血液黏度和流速。如果容器直径保持不变,每单位流量的增加会加快血流速度,从而增加WSS。WSS的最大值通常出现在弯曲血管段的外壁、动脉高度狭窄的区域和分叉的顶点区域。Cebra等^[36]在动脉瘤内高WSS区域观察到异常结构的胶原纤维,并且发现胶原纤维的排列方式与WSS的方向相关。

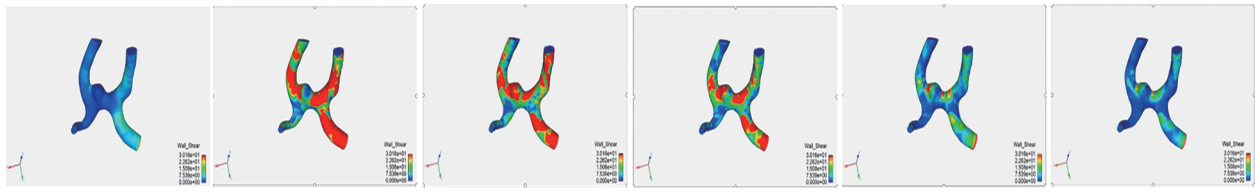


图3 1个心动周期内前交通动脉瘤上WSS的变化

正常生理情况下,血管的弹性层主要由弹性蛋白和胶原纤维组成,但动脉瘤壁一个明显的特征就是弹性蛋白的缺失。这使得胶原纤维承受了更多的流量负荷,原先曲折的胶原纤维过度拉伸,血管扩张能力因此受限。但是,与弹性蛋白相比,胶原纤维伸展能力是有限的,为适应这种变化,不可避免地发生重塑。而胶原纤维的重塑又决定了动脉瘤壁的厚度和动脉瘤的大小。这意味着,高WSS不仅引导血管壁的重塑,参与动脉瘤的起始部分,而且也影响了动脉瘤的发展。事实上,动物实验中也证实^[37],暴露于高流量的脑血管,即大脑动脉的分叉部,常形成节段性的扩张或动脉瘤。这一现象与临床中IA患者的位置特征相符合。并且,高WSS理论也合理解释了在合并高血压、某些结缔组织病患者中IA的患病率较高的原因。此外,Meng等^[38]认为,由高WSS触发的血管壁细胞介导的炎症重塑途径同样会导致动脉瘤破裂。如果WSS过高,则会导致细胞基质变性和细胞凋亡,即使动脉瘤尺寸很小,也易发生破裂。FuKuda等^[39]的前瞻性研究发现,动脉瘤的大小与WSS的大小呈负相关,这意味着较小的动脉瘤往往具有更大的WSS。这可以用来解释前交通动脉瘤拥有更小的破裂阈值的原因,其病理生理变化机制有待更进一步的研究。

2.1.2 低WSS 研究表明,低WSS与IA的破裂有关^[40]。一项纳入900例不同位置IA的荟萃分析结果表明,破裂的IA具有更小的WSS^[41]。如前所述,低WSS常在尺寸较大的动脉瘤壁上被观测到。更大的瘤腔致使更多的血液停滞在腔内,血流入流速率因此降低,局部相对缓慢的血液会诱导触发炎症细胞介导的炎症重塑途径,使得动脉壁粥样硬化加速,血管壁因此发生退化性变化,承受生理血流动力学力量能力降低,最终导致了破裂的结局。动物实验研究表明^[14],低WSS与高WSS诱导内皮细胞基因表达调控机制是不同的,甚至是相反的,并且,低WSS影响内皮细胞基因表达能力强于高WSS。因此,低WSS与高WSS对动脉瘤血管壁病理改变作用机制并不相同,这可能意味着在不同病理类型的动脉瘤中高低WSS的主导地位迥异,小的IA生长和破裂过程可能与高WSS理论中壁细胞介导炎症重塑途径有关,而低WSS所致的炎症细胞介导通路可能与以动脉瘤体内动脉粥样硬化和血栓形成成为病理特征的较大IA生长和破裂有关。相关机制目前仍存争议,尚需进一步明确。

2.2 梯度振荡数值(gradient oscillatory number, GON)

Shimogonya等^[42]最先提出GON的概念,用以描述作用于单位面积内血管内皮细胞的WSS水平方向以及垂直方向上矢量之比,即振荡张力/压缩力的比值。如果一个时间单位内,WSS在某个位置的变化很大,则每单位面积产生的剧烈变化的振荡张力/压缩力会施加在那里的内皮细胞上,造成该处的内皮细胞损伤,形成动脉瘤。因此,GON与动脉瘤形成位置具有相关性。Cebal等^[43]通过术中对动脉瘤不同壁厚区域进行标记分析证实,与动脉瘤壁其他区域相比,动脉瘤壁变薄的区域具有更高的GON值。

2.3 振荡剪切指数(oscillatory shear index, OSI)

OSI是衡量一个心动周期内WSS方向变化的血流动力学参数^[44],用以反映单位时间内WSS方向变化程度。较大OSI值意味着更为复杂的和不稳定的局部血流环境。振荡的血流并不利于血管壁的重塑,这可能与动脉瘤破裂有关。Xu等^[45]对未手术干预的小型未破裂前交通动脉瘤患者进行随访,在随后破裂的病例中观察到,动脉瘤顶流动再循环区表现出低WSS和较高的OSI。但OSI在预测动脉瘤破裂具体作用机制目前尚存争议,仍需进一步研究。

2.4 其他血流动力学参数

Zhang等^[46]的研究纳入了186名IA患者的206个微小动脉瘤(≤ 3.0 mm),通过单因素Logistic回归分析发现,较大面积的低壁面剪应力区域(low shear area)与动脉瘤的破裂状态有关。一项纳入15项研究的荟萃分析发表了相同的观点^[41]。此外,尚有相对阻滞时间、高振荡速度指数等血流动力学参数具有良好的应用前景。

3 局限与展望

高、低WSS作用机制在动脉瘤发生、破裂中矛盾,反映了动脉瘤壁复杂的病理生理变化。但不论是高WSS还是低WSS,因局部血管的WSS调节失衡而导致的内皮细胞损伤,是动脉瘤起始的因素之一^[14],血流动力学改变诱导的相关炎症重塑机制仍是今后研究的热点。并且,应用CFD模拟IA血流研究虽具有无创、可重复等优点,其主观性仍不容忽视。当前,CFD模拟血流动力学模型尚无统一标准,各文献中计算方法也不尽相同,计算结果自然因此大相径庭。因此,现阶段只能描述血流动力学参数的高低趋势,而无法建立客观的量化阈值。并且,考虑

到个体差异(如入流血管流速、血压、血管弹性等因素),也为CFD的计算提出了更高的要求。近年来,人们对前交通动脉瘤形态学的认识随着影像学技术的发展而深入,研究方向从动脉瘤最大径到A1与A2夹角的转变,是局部到整体变化。有文献报道^[47],ACoA与大脑前A2段的分叉角度与年龄呈正相关。所以,相信随着对前交通动脉瘤形态学研究地深入,还会有更多纳入空间、时间等因素的形态学特征被人们所揭露。总之,形态学和血流动力学的关系总是互为因果,这意味着应用形态学特征反映血流动力学变化是可行的^[48],这不仅有利于预测动脉瘤破裂的风险,更可以用来指导手术治疗及评估预后等。

参 考 文 献

- [1] TAWK RG, HASAN TF, D'SOUZA CE, et al. Diagnosis and treatment of unruptured intracranial aneurysms and aneurysmal subarachnoid hemorrhage[J]. *Mayo Clin Proc*, 2021, 96(7): 1970-2000.
- [2] HORIE N, SATO S, KAMINOGO M, et al. Impact of perioperative aneurysm rebleeding after subarachnoid hemorrhage[J]. *J Neurosurg*, 2020, 133(5): 1401-1410.
- [3] ZHAO B, FAN YL, XIONG Y, et al. Aneurysm rebleeding after poor-grade aneurysmal subarachnoid hemorrhage: predictors and impact on clinical outcomes[J]. *J Neurol Sci*, 2016, 371: 62-66.
- [4] MA N, FENG X, WU ZX, et al. Cognitive impairments and risk factors after ruptured anterior communicating artery aneurysm treatment in low-grade patients without severe complications: a multicenter retrospective study[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 613785.
- [5] İDİL SOYLU A, UZUNKAYA F, AKAN H. Anterior communicating artery aneurysms: Nonmodifiable morphological parameters associated with rupture risk[J]. *J Neuroimaging*, 2021, 31(5): 940-946.
- [6] NORDAHL ER, UTHAMARAJ S, DENNIS KD, et al. Morphological and hemodynamic changes during cerebral aneurysm growth[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(4): 520.
- [7] LIU QY, ZHANG YS, YANG JH, et al. The relationship of morphological-hemodynamic characteristics, inflammation, and remodeling of aneurysm wall in unruptured intracranial aneurysms[J]. *Transl Stroke Res*, 2022, 13(1): 88-99.
- [8] JAGADEESAN BD, DELGADO ALMANDOZ JE, KADKHO-DAYAN Y, et al. Size and anatomic location of ruptured intracranial aneurysms in patients with single and multiple aneurysms: a retrospective study from a single center[J]. *J Neurointerv Surg*, 2014, 6(3): 169-174.
- [9] FENG X, JI WJ, QIAN ZH, et al. Bifurcation location is significantly associated with rupture of small intracranial aneurysms (< 5 mm)[J]. *World Neurosurg*, 2017, 98: 538-545.
- [10] ZHENG Y, ZHOU B, WANG X, et al. Size, aspect ratio and anatomic location of ruptured intracranial aneurysms: consecutive series of 415 patients from a prospective, multicenter, observational study[J]. *Cell Transplant*, 2019, 28(6): 739-746.
- [11] IKAWA F, MORITA A, TOMINARI S, et al. Rupture risk of small unruptured cerebral aneurysms[J]. *J Neurosurg*, 2019: 1-10.
- [12] UCAS Japan Investigators, MORITA A, KIRINO T, et al. The natural course of unruptured cerebral aneurysms in a Japanese cohort[J]. *N Engl J Med*, 2012, 366(26): 2474-2482.
- [13] WANG GX, WANG S, LIU LL, et al. A simple scoring model for prediction of rupture risk of anterior communicating artery aneurysms[J]. *Front Neurol*, 2019, 10: 520.
- [14] MOREL S, SCHILLING S, DIAGBOUGA MR, et al. Effects of low and high aneurysmal wall shear stress on endothelial cell behavior: differences and similarities[J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 727338.
- [15] MA XK, YANG Y, LIU DT, et al. Demographic and morphological characteristics associated with rupture status of anterior communicating artery aneurysms[J]. *Neurosurg Rev*, 2020, 43(2): 589-595.
- [16] XU T, LIN BL, LIU SL, et al. Larger size ratio associated with the rupture of very small (≤ 3 mm) anterior communicating artery aneurysms[J]. *J Neurointerv Surg*, 2017, 9(3): 278-282.
- [17] FUTAMI K, NAMBU I, KITABAYASHI T, et al. Inflow hemodynamics evaluated by using four-dimensional flow magnetic resonance imaging and the size ratio of unruptured cerebral aneurysms[J]. *Neuroradiology*, 2017, 59(4): 411-418.
- [18] CHEN YC, XING HX, LIN BL, et al. Morphological risk model assessing anterior communicating artery aneurysm rupture: development and validation[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2020, 197: 106158.
- [19] RINALDO L, MCCUTCHEON BA, MURPHY ME, et al. Relationship of A₁ segment hypoplasia to anterior communicating artery aneurysm morphology and risk factors for aneurysm formation[J]. *J Neurosurg*, 2017, 127(1): 89-95.
- [20] JABBARLI R, REINHARD M, ROELZ R, et al. Clinical relevance of anterior cerebral artery asymmetry in aneurysmal subarachnoid hemorrhage[J]. *J Neurosurg*, 2017, 127(5): 1070-1076.
- [21] ZHANG J, CAN A, LAI PMR, et al. Vascular geometry associated with anterior communicating artery aneurysm formation[J]. *World Neurosurg*, 2021, 146: e1318-e1325.
- [22] ZHANG Y, ZHOU G, LIU WD, et al. Analysis of risk factors for anterior communicating artery aneurysm rupture: a single-center study[J]. *World Neurosurg*, 2021, 153: e59-e65.
- [23] KASUYA H, SHIMIZU T, NAKAYA K, et al. Angles between A₁ and A₂ segments of the anterior cerebral artery visualized by three-dimensional computed tomographic angiography and association of anterior communicating artery aneurysms[J]. *Neurosurgery*, 1999, 45(1): 89-93.
- [24] YE JY, ZHENG PD, HASSAN M, et al. Relationship of the

- angle between the A1 and A2 segments of the anterior cerebral artery with formation and rupture of anterior communicating artery aneurysm[J]. *J Neurol Sci*, 2017, 375: 170-174.
- [25] GAO BL, HAO WL, REN CF, et al. Greater hemodynamic stresses initiated the anterior communicating artery aneurysm on the vascular bifurcation apex[J]. *J Clin Neurosci*, 2022, 96: 25-32.
- [26] ZHANG XJ, LI CH, HAO WL, et al. The optimality principle decreases hemodynamic stresses for aneurysm initiation at anterior cerebral artery bifurcations[J]. *World Neurosurg*, 2019, 121: e379-e388.
- [27] ZIMELEWICZ OBERMAN D, PEREZ AKLY MS, RABELO NN, et al. Morphologic variations in the circle of Willis as a risk factor for aneurysm rupture in the anterior and posterior communicating arteries[J]. *World Neurosurg*, 2021, 154: e155-e162.
- [28] KRYSZKIEWICZ K, CISZEK B, SZYLBERG Ł, et al. Morphological analysis of cerebral artery fenestrations and their correlation with intracranial aneurysms[J]. *World Neurosurg*, 2021, 156: e85-e92.
- [29] KRZYŻEWSKI RM, KLIŚ KM, KWINTA BM, et al. Analysis of anterior cerebral artery tortuosity: association with anterior communicating artery aneurysm rupture[J]. *World Neurosurg*, 2019, 122: e480-e486.
- [30] CEBRAL J, OLLIKAINEN E, CHUNG BJ, et al. Flow conditions in the intracranial aneurysm lumen are associated with inflammation and degenerative changes of the aneurysm wall[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017, 38(1): 119-126.
- [31] ZHANG X, KARUNA T, YAO ZQ, et al. High wall shear stress beyond a certain range in the parent artery could predict the risk of anterior communicating artery aneurysm rupture at follow-up [J]. *J Neurosurg*, 2018, 131(3): 868-875.
- [32] FERGUSON GG. Physical factors in the initiation, growth, and rupture of human intracranial saccular aneurysms[J]. *J Neurosurg*, 1972, 37(6): 666-677.
- [33] ROACH MR, SCOTT S, FERGUSON GG. The hemodynamic importance of the geometry of bifurcations in the circle of Willis (glass model studies)[J]. *Stroke*, 1972, 3(3): 255-267.
- [34] KOSEKI H, MIYATA H, SHIMO S, et al. Two diverse hemodynamic forces, a mechanical stretch and a high wall shear stress, determine intracranial aneurysm formation[J]. *Transl Stroke Res*, 2020, 11(1): 80-92.
- [35] SASAKI T, KAKIZAWA Y, YOSHINO M, et al. Numerical analysis of bifurcation angles and branch patterns in intracranial aneurysm formation[J]. *Neurosurgery*, 2019, 85(1): E31-E39.
- [36] CEBRAL JR, DUAN XJ, GADE PS, et al. Regional mapping of flow and wall characteristics of intracranial aneurysms[J]. *Ann Biomed Eng*, 2016, 44(12): 3553-3567.
- [37] MIYATA H, SHIMIZU K, KOSEKI H, et al. Real-time imaging of an experimental intracranial aneurysm in rats[J]. *Neurol Med Chir (Tokyo)*, 2019, 59(1): 19-26.
- [38] MENG H, TUTINO VM, XIANG J, et al. High WSS or low WSS? Complex interactions of hemodynamics with intracranial aneurysm initiation, growth, and rupture: toward a unifying hypothesis[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2014, 35(7): 1254-1262.
- [39] FUKUDA S, SHIMOGONYA Y, YONEMOTO N, et al. Differences in cerebral aneurysm rupture rate according to arterial anatomies depend on the hemodynamic environment[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40(5): 834-839.
- [40] LV N, KARMONIK C, CHEN SY, et al. Wall enhancement, hemodynamics, and morphology in unruptured intracranial aneurysms with high rupture risk[J]. *Transl Stroke Res*, 2020, 11(5): 882-889.
- [41] HAN P, JIN DS, WEI W, et al. The prognostic effects of hemodynamic parameters on rupture of intracranial aneurysm: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Surg*, 2021, 86: 15-23.
- [42] SHIMOGONYA Y, ISHIKAWA T, IMAI Y, et al. Can temporal fluctuation in spatial wall shear stress gradient initiate a cerebral aneurysm? A proposed novel hemodynamic index, the gradient oscillatory number (GON)[J]. *J Biomech*, 2009, 42(4): 550-554.
- [43] CEBRAL JR, DETMER F, CHUNG BJ, et al. Local hemodynamic conditions associated with focal changes in the intracranial aneurysm wall[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40(3): 510-516.
- [44] CORNELISSEN BMW, LEEMANS EL, SLUMP CH, et al. Hemodynamic changes after intracranial aneurysm growth[J]. *J Neurosurg*, 2022, 136(6): 1738-1744.
- [45] XU LJ, ZHU YQ, ZHANG RJ, et al. Geometrical and hemodynamic characteristic changes of small anterior communicating artery aneurysms during follow-ups in a retrospective analysis [J]. *Neurol India*, 2021, 69(5): 1338-1342.
- [46] ZHANG YS, TIAN ZB, JING LK, et al. Bifurcation type and larger low shear area are associated with rupture status of very small intracranial aneurysms[J]. *Front Neurol*, 2016, 7: 169.
- [47] ZHANG XJ, GAO BL, HAO WL, et al. Presence of anterior communicating artery aneurysm is associated with age, bifurcation angle, and vessel diameter[J]. *Stroke*, 2018, 49(2): 341-347.
- [48] ZHANG MQ, PENG F, TONG X, et al. Associations between haemodynamics and wall enhancement of intracranial aneurysm [J]. *Stroke Vasc Neurol*, 2021, 6(3): 467-475.

责任编辑:王荣兵