

论 著

4D FLOW MRI在动脉瘤载瘤动脉血流动力学分析中的应用研究*

胡坤江 宫希军*

安徽医科大学第二附属医院放射科
(安徽 合肥 230601)

【摘要】目的 基于4D FLOW MRI血流成像技术,分析囊状颅内动脉瘤载瘤动脉的血流动力学特征,探索其在动脉瘤形成及诊断中的应用价值。**方法** 研究招募2020年1月至2024年6月期间在安徽医科大学第二附属医院就诊的64例颅内囊状动脉瘤患者为受试者。所有患者均接受4D FLOW MRI检查,记录载瘤动脉与对侧对称动脉的形态特征及血流动力学参数,通过组间比较、单因素及多因素Logistic回归分析,筛选与载瘤动脉相关的独立预测因子。进一步绘制受试者工作特征(ROC)曲线,计算曲线下面积(AUC),以评估血流动力学参数的诊断效能。**结果** 载瘤动脉瘤颈入口处的WSSave、WSSmax和WSSTGave均显著高于对侧动脉对称位置($P<0.05$),WSSave是诊断载瘤动脉的独立预测因子,AUC值为0.745。**结论** 异常的血流动力学参数可能是动脉瘤形成的重要影响因素之一。基于4D FLOW MRI的血流动力学参数能够有效区分载瘤动脉,为动脉瘤的诊断及临床管理提供了新依据。

【关键词】 四维血流磁共振成像; 颅内动脉瘤; 载瘤动脉; 血流动力学

【中图分类号】 R445.2

【文献标识码】 A

【基金项目】 2023年度安徽省高校自然科学基金资助项目(2023AH053162)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.08.008

Application of 4D Flow MRI in the Analysis of Hemodynamics in Parent Arteries of Aneurysms*

HU Kun-jiang, Gong Xi-jun*

Department of Radiology, The Second Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230601, Anhui Province, China

ABSTRACT

Objective To analyze the hemodynamic characteristics of the parent arteries of saccular intracranial aneurysms using 4D FLOW MRI blood flow imaging technology, and to explore its application value in the formation and diagnosis of aneurysms. **Methods** The study enrolled 64 patients with saccular intracranial aneurysms who visited the Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University from January 2020 to June 2024. All patients underwent 4D FLOW MRI examination, and the morphological features and hemodynamic parameters of the parent arteries and their symmetric counterparts were recorded. Independent predictive factors associated with the parent arteries were selected through intergroup comparisons, univariate, and multivariate Logistic regression analysis. Furthermore, the receiver operating characteristic (ROC) curves were plotted, and the area under the curve (AUC) was calculated to assess the diagnostic efficacy of the hemodynamic parameters. **Results** The WSSave, WSSmax, and WSSTGave at the neck entrance of the aneurysm were all significantly higher than those at the symmetric positions of the contralateral artery ($P<0.05$), with WSSave being an independent predictive factor for the diagnosis of the parent artery, and the AUC value was 0.745. **Conclusion** Abnormal hemodynamic parameters may be one of the important factors influencing the formation of aneurysms. Hemodynamic parameters based on 4D FLOW MRI can effectively distinguish parent arteries, providing a new basis for the diagnosis and clinical management of aneurysms.

Keywords: 4D Flow MRI; Intracranial Aneurysm; Parent Artery; Hemodynamics

载瘤动脉是为动脉瘤提供血流的主要通路,其结构和功能的变化是动脉瘤形成与进展的基础^[1]。Shehata等^[2]研究发现,颅内动脉瘤的形成和进展与载瘤动脉的血流动力学异常密切相关。然而,既往研究普遍缺乏检测颅内动态血流特征的有效手段^[3],忽略了动态血流生物力学特性在动脉瘤形成和进展的作用^[4]。四维血流磁共振成像(four-dimensional flow magnetic resonance imaging, 4D FLOW MRI)作为一种创新成像技术,能够全面量化包括血流速度、壁面剪切应力(wall shear stress, WSS)、壁面剪切力梯度(wall shear stress gradient, WSSTG)以及震荡指数(oscillatory shear index, OSI)在内的血流动力学参数^[5]。利用4D FLOW MRI不仅可以从整体上反映载瘤动脉的血流动力学特性,还能通过对比分析同一患者组内载瘤动脉与对侧对称动脉的差异,揭示动脉瘤的形成机制,从而为动脉瘤的诊断和管理提供新的研究基础。

本研究基于4D FLOW MRI技术,探索血流动力学因素在动脉瘤形成中的作用,展示血流动力学参数的异常在影响动脉瘤的发生和发展方面的作用,从而为动脉瘤的预防和治疗提供新的视角和科学依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 本研究招募了2020年1月至2024年6月在安徽医科大学第二附属医院确诊为颅内囊状未破裂动脉瘤的64例患者作为研究对象。

纳入标准: 影像检查证实存在颅内动脉瘤;扫描图像质量佳,符合诊断及后处理要求;未进行颅内手术治疗。排除标准:多发动脉瘤、基底动脉瘤等位于颅内非对称位置的动脉瘤;非动脉瘤因素导致显著血流改变;存在其他颅内病变的患者。

研究方案经安徽医科大学第二附属医院伦理委员会批准(编号: YX2024-017 F1),所有患者签署知情同意书。

1.2 检查方法和4D FLOW MRI数据预处理 采用 PHILIPS Ingenia 3.0T CX磁共振扫描仪对所有入组患者进行检查,扫描区域涵盖动脉瘤所在动脉及对侧对称动脉。采集时受检者取仰卧位,自由呼吸,使用指脉门控。磁共振 4D-FLOW 序列扫描参数: TR 8.1 ms, TE 3.6 ms, 翻转角 20°, 采集体素 1.0 mm × 1.0 mm × 1.0 mm, 带宽 480 Hz/pixel, FOV 160mm × 160 mm, 层厚 1.0mm, Heart phases默认19, 根据患者心率进行调整,采集时间视患者心率而定,约6~15 min。对 3 个方向进行流速编码,编码速度设120 cm/s。将4D FLOW MRI 数据导入后处理软件(FlowExplorer3, 北京清华康科技有限公司),手动设置血流垂直截面,感兴趣区截取位置分别在载瘤动脉的囊状动脉瘤入口截面处及对侧动脉对称位置截面处,自动获取血流动力学参数,见图1,包括 WSSmax、WSSave, OSImax, OSISave, WSSTGmax, WSSTGave、能量损失(energy loss)、舒张期末期速度(end diastolic velocity, EDV)、收缩期峰值速度(peak systolic velocity, PSV)、阻力指数(resistance index, RI)、搏动指数(pulsatility index, PI)。WSS、OSI和WSSTG分别代表血流与血管壁之间的摩擦力、WSS随时间的变化率以及血流与血管壁之间摩擦力在血管壁上的空间变化率^[6], WSS、OSI、WSSTG中的最大值和

【第一作者】 胡坤江,男,住院医师,主要研究方向:心血管疾病影像诊断及研究。E-mail: 2698452079@qq.com

【通讯作者】 宫希军,男,主任医师,主要研究方向:腹部及心血管疾病影像诊断及研究。E-mail: 382319889@qq.com

平均值分别代表心动周期内该血流参数的最大值和平均值。EDV和PSV表示为心动周期内该平面血流速度的最小值和最大值^[7]。PI反映血管内血流脉冲性的指标，RI反映血管阻力的指标^[8]。

1.3 动脉瘤形态学数据测量 测量动脉瘤体高度(H)、载瘤动脉与对称位置对侧动脉直径A、B，并计算瘤体高度与载瘤动脉直径比值，即大小比(size ratio, SR)。

1.4 统计学分析方法 采用 SPSS 27.0软件，正态分布的计量资料用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示，组间比较采用t检验；非正态分布的计量资料用中位数、四分位数[M(P₂₅, P₇₅)]表示，组间比较采用非参数检验；将具有统计学意义的组间差异变量将纳入单因素及多因素Logistic回归分析。构建受试者工作特征(ROC)曲线，以评估独立预测因子对载瘤动脉的诊断效能。所有统计测试中，P<0.05被认定为具有统计学意义。

表1 动脉瘤患者影像基线特征

基线特征	动脉瘤(n=64)
瘤体高度(mm)	4.538±2.231
载瘤动脉直径(mm)	3.359±0.968
对侧动脉直径(mm)	3.211±1.024
SR	0.948±0.792

表3 载瘤动脉相关因素的logistic回归分析

相关因素	单因素			多因素		
	P	OR值	95% CI	P	OR值	95% CI
WSSave	<0.0001	12.625	4.176~38.166	<0.0001	10.145	3.106~33.137
WSSmax	0.005	2.342	1.299~4.222			
WSSTGave	0.035	1.207	1.013~1.438			

表4 SR值与载瘤动脉相关的血流因素间的Pearson相关性分析

	WSSave	WSSmax	WSSTGave
相关系数	0.190	0.234	0.173

2 结果

2.1 动脉瘤患者形态特征 共纳入64例患者，瘤体平均高度为4.538±2.231 mm，载瘤动脉直径为3.359±0.968 mm，对侧动脉直径为3.211±1.024 mm。见表1。

2.2 不同截面血流动力学参数及血管直径配对分析结果 在载瘤动脉的囊状动脉瘤入口截面和对侧动脉对称位置进行血流动力学分析，结果表明载瘤动脉入口处的WSSave、WSSmax及WSSTGave均显著高于对侧动脉对称截面的血流参数(P<0.05)，而OSI和能量损耗无显著差异(P>0.05)。详见表2。

2.3 与载瘤动脉相关的血流因素的logistic回归分析 本研究通过单因素Logistic回归分析识别出WSSave、WSSTGave和WSSmax为区分载瘤动脉的显著相关因素(P<0.05)。多因素Logistic回归分析显示，WSSmax是区分载瘤动脉的独立预测因子(OR=10.145, 95%CI: 3.106~33.137)，进一步排除动脉瘤形态在载瘤动脉的影响，结果显示SR值与这些血流因素之间相关性弱。详见表3、4。

表2 不同截面血流动力学配对分析结果

	载瘤动脉入口截面	对侧动脉对称截面	t/z	P
血管直径	3.36±0.97	3.21±1.02	1.965	0.054
WSSave(Pa)	1.61±0.42	1.25±0.32	-5.353	<0.001
WSSmax(Pa)	2.331(1.9,2.8)	2.070(1.7,2.4)	-3.060	0.002
OSIave	0.011(0.0,0.0)	0.009(0.0,0.0)	-1.015	0.310
OSImax	0.175(0.0,0.4)	0.167(0.1,0.3)	-0.624	0.532
WSSTGave(pa/s)	4.738(3.8,6.2)	4.128(3.6,4.8)	-2.183	0.029
WSSTGmax(pa/s)	18.086(6.7,32.9)	9.214(6.0,24.3)	-1.596	0.110
Energy Loss(mW)	0.450(0.2,0.7)	0.373(0.1,0.8)	-0.824	0.410
EDV(cm/s)	25.57±6.54	25.47±7.49	-0.085	0.932
PSV(cm/s)	50.04±13.30	49.57±12.25	-0.212	0.833
RI	0.48±0.09	0.49±0.09	0.561	0.576
PI	0.64±0.15	0.65±0.15	0.278	0.782

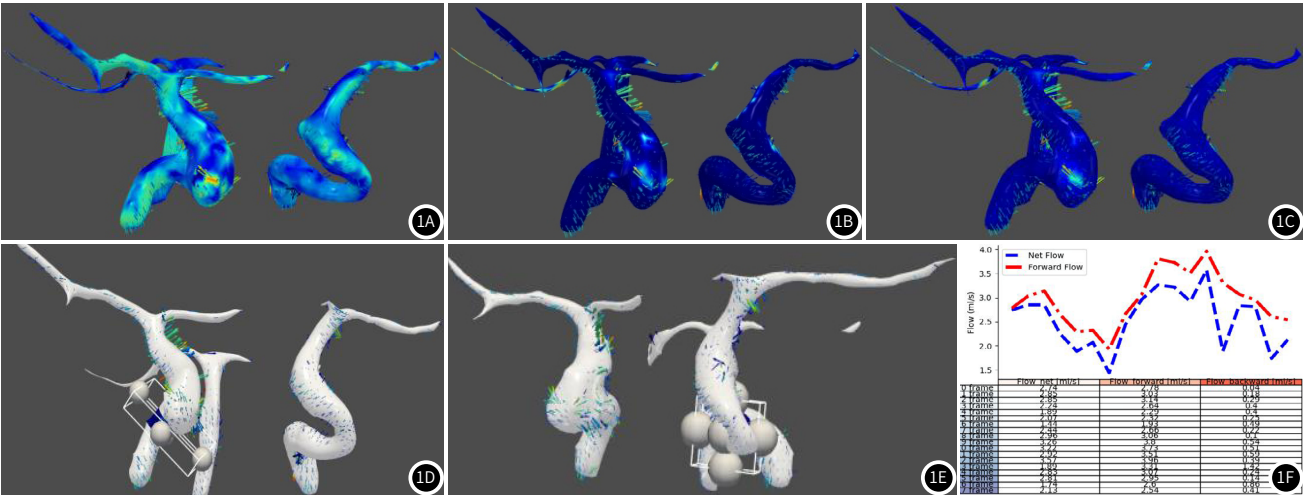


图1A-图1F 在后处理软件中对1A进行图像后处理，血管重建图的颜色变化代表了不同的血流参数值，数值从低到高表现为从蓝色渐变至红色。1A-1C：一枚右侧颈内动脉眼段的动脉瘤，分别表示WSS、OSI、WSSTG在流速迹线模型下的血流动力学重建图像，在1A中载瘤动脉表现出较对侧更高的WSS；1D-1E：为设置血流垂直截面，感兴趣区截取位置分别在载瘤动脉的囊状动脉瘤入口截面处及对侧动脉对称位置截面处的示意图；1F：为截面处血流留下在心动周期内的流速变化。

2.4 与载瘤动脉相关的因素区分载瘤动脉的效能 WSSave、WSSmax和WSSTGave的曲线下面积(area under curve, AUC)分

别为 0.745、0.657、0.612, WSSave的诊断效能最高, 敏感度与特异性分别为0.5、0.875。详见表5, 图2。

表5 与载瘤动脉相关的因素区分载瘤动脉的效能

	AUC	最佳界值	敏感度	特异性	Cut-off	95% CI	P
WSSave	0.745	0.375	0.5	0.875	1.623	0.662 ~ 0.829	<0.0001
WSSmax	0.657	0.266	0.469	0.797	2.374	0.562 ~ 0.751	0.002
WSSTGave	0.612	0.297	0.438	0.859	4.956	0.513 ~ 0.711	0.029

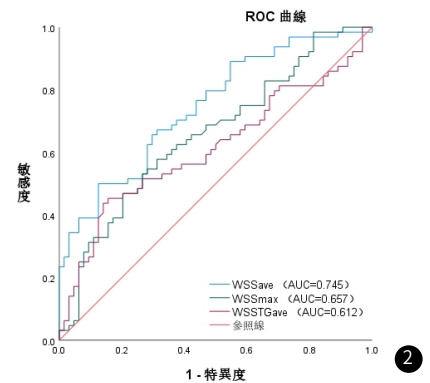


图2 WSSave、WSSTGave和WSSmax的ROC曲线。

3 讨论

在既往的颅内动脉瘤研究中, 研究者通常通过静态影像(如CTA或MRA)分析动脉瘤形态来评估破裂风险, 忽视了载瘤动脉以及其所处的血流环境^[9-10]。本研究基于4D FLOW MRI技术, 分析颅内动脉瘤载瘤动脉的血流动力学特征, 并探讨了这些特征与动脉瘤形成之间的关系。结果表明, 载瘤动脉在瘤颈入口处的WSSave、WSSmax及WSSTGave均显著升高, 其中WSSave作为独立预测因子, 显示其在动脉瘤诊断中的潜在应用价值, 载瘤动脉的血流动力学参数差异可以解释动脉瘤的形成的原因, 基于4D FLOW MRI的血流动力学参数具有区分载瘤动脉的诊断价值。

在动脉瘤形成的研究中, 动脉瘤的形成与载瘤动脉特定区域的高WSS有关^[11], 这与本研究中载瘤动脉的WSSave和WSSmax高于对侧动脉的结果一致。高WSS可诱导内皮细胞分泌炎症因子(如白介素-6、单核细胞趋化蛋白-1), 引发局部炎症反应, 从而破坏内皮屏障, 导致血管壁结构重塑^[12], 这被认为是IA发生的早期血流动力学机制之一。这些变化包括内皮细胞的形态学改变、炎症反应以及基质金属蛋白酶的释放, 这些因素共同作用, 削弱了血管壁的结构完整性, 使其更容易形成动脉瘤^[13]。此外, 本研究中WSSTGave的显著升高, 表明载瘤动脉血流模式更为复杂且存在较大的WSS梯度变化。WSSTG的异常可能导致内皮细胞承受不均匀的力学刺激, 进一步加速动脉瘤的形成与扩展^[14-15]。也有研究^[16]表明, 这些血流参数在动脉瘤瘤颈部普遍低于载瘤动脉的入口截面, 这种现象意味着动脉瘤的形成在某种意义上是血管试图通过降低局部的WSS和WSSTG来适应异常血流状态的结果。本研究结果表明动脉瘤形成过程中血流动力学环境的重要性, 尤其是在高应力区域的内皮细胞响应中起到关键作用。

OSI反映了血流方向变化的程度, 较高的OSI通常与血流紊乱有关^[17]。相关研究^[18]表明, 较高的OSI可能与动脉瘤破裂风险升高相关, 本研究中载瘤动脉的OSI无显著差异, 可能是由于研究对象以未破裂动脉瘤为主, 血流方向变化的显著性尚未达到统计学水平。能量损失是描述血管壁吸收能量的新型血流参数^[19], 已被用于评估瓣膜狭窄^[20]、主动脉夹层^[21]以及心脏手术治疗效果^[22]。在动脉瘤的评估中, 能量损失可以用来预测动脉瘤的破裂风险。本研究未观察到载瘤动脉的能量损耗显著升高, 这可能与颅内血流的低阻力特性有关。能量损耗更多地反映大血管(如主动脉)的血流

动力学异常^[23], 其在颅内小血管病变中的作用可能有限。

通过多因素回归分析, 本研究确认WSSave为载瘤动脉的独立预测因子, 其AUC值为0.745, 具有中等的诊断效能。其敏感性相对较低(50%), 特异性较高(87.5%), 提示WSSave可能更适用于特异性要求较高的临床场景, 如高危动脉瘤患者的筛查。这一发现进一步支持了利用4D FLOW MRI量化血流动力学参数以辅助颅内动脉瘤诊断的可能性。

本文的局限性: (1)首先是样本量较小且为单中心研究, 未来的研究应进一步扩大样本量, 并探索更多血流动力学指标与动脉瘤进展之间的关系。(2)动脉瘤类型单一, 研究仅纳入未破裂囊状动脉瘤, 尚未分析不同类型(如梭形动脉瘤)或状态(如破裂动脉瘤)之间的差异。(3)未进行动态变化评估, 4D FLOW MRI提供的是某一时点的血流动力学特征, 未来可尝试动态监测随时间变化的血流参数, 以评估其与动脉瘤进展的相关性。

本研究验证了基于4D FLOW MRI技术的血流动力学分析在颅内动脉瘤研究中的可行性, 并揭示了载瘤动脉高WSS可能是动脉瘤形成的重要机制。这一技术为临床实践提供了无创、量化的血流评估手段, 有望应用于动脉瘤的早期筛查、治疗决策及预后评估中。此外, 未来结合更多影像学学和遗传学数据, 有望进一步提高诊断及风险分层的精准性。

参考文献

- [1] Gao BL, Hao H, Hao W, et al. Cerebral aneurysms at major arterial bifurcations are associated with the arterial branch forming a smaller angle with the parent artery[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 5106.
- [2] Shehata MA, Ibrahim MK, Ghozy S, et al. Long-term outcomes of flow diversion for unruptured intracranial aneurysms: a systematic review and meta-analysis[J]. J Neurointerv Surg, 2023, 15(9): 898-902.
- [3] Chen B, Huang S, Zhang L, et al. Global tendencies and frontier topics in hemodynamics research of intracranial aneurysms: a bibliometric analysis from 1999 to 2022[J]. Front Physiol, 2023, 14: 1157787.
- [4] Zhu Y, Zou R, Sun X, et al. Assessing the risk of intracranial aneurysm rupture using computational fluid dynamics: a pilot study[J]. Front Neurol, 2023, 14: 1277278.

