综述

Application and research progresses of 4D flow MRI for intracranial aneurysm

YANG Yanchen[1]，BAI Bin[1]，CHENG Yunzhang[1*]，LYU Nan[2]

(1. Shanghai Engineering Research Center of Interventional Medical Devices，University of Shanghai for Science and Technology，Shanghai 200093，China；2. Department of Neurosurgery，Changhai Hospital of Shanghai，Shanghai 200433，China)

[**Abstract**] Intracranial aneurysm (IA) is a disease with high incidence rate，also high disability and high mortality rate. Hemodynamic parameters play an important role for evaluating the rupture risk and prognosis of aneurysms. Four-dimensional flow MRI (4D flow MRI) is a new phase contrast MRI technique，which can display the lesions' blood flow patterns comprehensively and intuitively，and evaluate the hemodynamic parameters better than traditional two-dimensional phase contrast MRI (2D PC MRI) and Doppler ultrasound，been gradually applied in the analysis of the intracranial，cardiac and other hemodynamics. The application and research progresses of 4D flow MRI for IA were reviewed in this article.

[**Keywords**] magnetic resonance imaging；intracranial aneurysm；hemodynamics

DOI：10.13929/j.issn.1003-3289.2021.07.032

4D flow MRI 技术用于颅内动脉瘤进展

杨彦晨[1]，白　斌[1]，程云章[1*]，吕　楠[2]

(1. 上海理工大学上海介入医疗器械工程技术研究中心，上海　200093；2. 上海长海医院神经外科，上海　200433)

[**摘　要**] 颅内动脉瘤(IA)发病率、致残率及死亡率均较高。血流动力学是评估动脉瘤破裂风险和预测预后的重要依据。四维血流 MRI(4D flow MRI)是新型相位对比 MRI 技术，可较传统二维相位对比 MRI(2D PC MRI)和多普勒超声更为全面直观地展示病变的血流模式、更准确地定量评价血流动力学参数，目前已用于分析颅内、心脏等的血流动力学。本文就 4D flow MRI 技术用于 IA 进展进行综述。

[**关键词**] 磁共振成像；颅内动脉瘤；血流动力学

[**中图分类号**] R543.5；R445.2　[**文献标识码**] A　[**文章编号**] 1003-3289(2021)07-1098-04

颅内动脉瘤(intracranial aneurysm，IA)检出率逐年升高，其破裂导致的蛛网膜下腔出血严重威胁患者生命，故评估 IA 的破裂风险和预后极其重要。以往多依靠 IA 形态(大小、形状、位置)和临床资料(年龄、性别、既往史)进行评估，随后引入相关血流动力学指标。二维相位对比 MRI(two-dimensional phase contrast MRI，2D PC MRI)是评估血流以及血管和心脏功能的重要方法。随着血流动力学的发展，四维血流 MRI(four-dimensional flow MRI，4D flow MRI)得以实现，并用于分析 IA、腹部血管及心脏血管等的血流动力学。

1　4D flow MRI 技术原理

相位对比 MRI(phase contrast MRI，PC MRI)多利用双极梯度场对流体进行编码，通过流体中质子相位的变化进行成像：在流动方向施加一对大小和持续

[**基金项目**] 上海工程技术研究中心建设立项(18DZ2250900)、国家自然科学基金青年科学基金(81701775)、上海市卫生健康委员会科研课题计划(20194Y0131)。

[**第一作者**] 杨彦晨(1996—)，男，上海人，在读硕士。研究方向：神经介入。E-mail：193832301@st.usst.edu.cn

[**通信作者**] 程云章，上海理工大学上海介入医疗器械工程技术研究中心，200093。E-mail：cyz2008@usst.edu.cn

[**收稿日期**] 2020-08-13　[**修回日期**] 2021-5-22

时间相同而方向相反的梯度场，双极梯度场激发后，静止组织的相位变化抵消、相位差为零，而血液因其流动性而发生位置变化，其相位差得以保留；利用血流相位差可区分血管与其他组织，并计算血流速度。目前 2D PC MRI 多用于检测峰值血流、逆向血流、每搏输出量等，并可通过计算获取更多血流动力学参数，如压力梯度等[1]；4D flow MRI 则是对 3 个方向的血流进行编码，以获取三维图像，由此得到血流方向、速度等，亦可通过计算获取更多参数，如壁面剪切应力（wall shear stress，WSS）和压力梯度等[2]。

2　4D flow MRI 在 IA 的应用

2.1　检测能力　IA 血流较复杂，多采用 2D PC MRI 通过测量 3 个方向的血流速度分量加以显示，但定位困难且耗时，且二维图像可提供的数据有限。刘东婷等[3]以 4D flow MRI 分析腹部主动脉夹层真腔和假腔的血流动力学特点，获得 2D PC MRI 难以实现的三维血流动力学图像，证实 4D flow MRI 技术可完整显示复杂血流，较传统 2D PC MRI 更具优势。

多普勒超声多用于检测大血管血流，并通过所得平均血流速度和血管横截面积计算血流量。BOCK 等[4]发现 4D flow MRI 亦能获得多普勒超声所得血流数据。SUQIN 等[5]对比接受血液透析动静脉瘘患者的 4D flow MRI 和多普勒超声数据，发现后者只能展现二维血流信息，无法获得精确的 WSS 数据，而前者不仅能提供任意位置的血流速度，还可获得三维可视化信息，以评估血流动力学参数。

采用数字减影血管造影（digital subtraction angiography，DSA）也可获取血管模型，并通过计算流体力学（computational fluid dynamics，CFD）得到血流动力学参数。已有多项研究[6-8]表明 CFD 与 4D flow MRI 获得的血流动力学参数具有较好一致性。ISODA 等[9]分别采用 CFD 和 4D flow MRI 对 5 例 IA 获取速度矢量场、流线、剪切速率、WSS、振荡剪切指数（图 1），二者所测速度矢量场的一致性良好，剪切速率模式和位置相似，获得最高振荡剪切指数的位置相近，但 WSS 的一致性一般，可能与壁面附近血流速度较慢、导致 4D flow MRI 测量错误有关，也表明了联合应用二者的重要性。

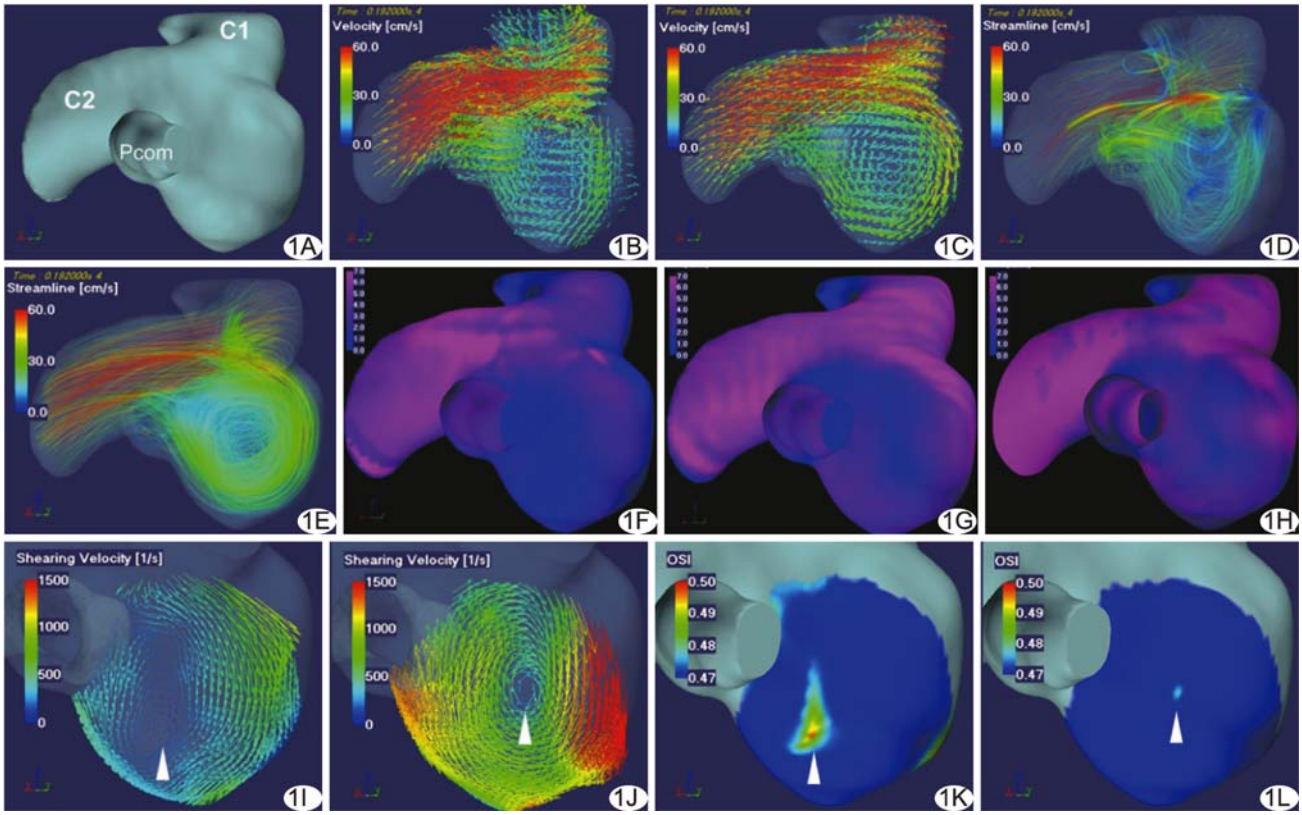


图 1　患者女，51 岁，右侧颈内动脉后交通支动脉瘤，直径 6 mm[9]　A. 表面渲染图像示动脉瘤有 2 个出口；B. 3D 速度矢量场图（MRI）；C. 3D 速度矢量场图（CFD）；D. 3D 流线图（MRI）；E. 3D 流线图（CFD）；F. 3D WSS 分布图（MRI 通过参考点流速得到的剪切速率计算数据图）；G. 3D WSS 分布图（CFD 通过参考点流速得到的剪切速率计算数据图）；H. 3D WSS 分布图（计算点数据图通过节点流速得到的剪切速率计算数据图）；I. 剪切速率（MRI）；J. 剪切速率（CFD）；K. 震荡剪切指数分布图（MRI）；L. 震荡剪切指数分布图（CFD）

2.2　可视化　三维可视化对判断动脉瘤血流模式极其重要。传统 2D PC MRI 只能获取二维图像，而 4D flow MRI 则能通过时间分辨三维成像完整展示血流模式，具有可视化优势。获取数据后，4D flow MRI 的三维可视化形式主要包括速度矢量图、流线图及色彩编码图等[10]。速度矢量图能显示针对某特定体素测得的血流速度方向和大小，生成的矢量方向平行于血流方向，可定性评价血液流入流出的方向和角度。流线图有助于显示涡旋流动等特殊血流模式。将某平面的血流色彩编码图与通过 MRI 获得的断面解剖图像相结合，可更直观地显示血流模式。HOPE 等[11]采用 4D flow MRI 对比 13 例升主动脉瘤患者与 19 名健康志愿者的升主动脉血流（图 2），发现血液反流轨迹多与主动脉弓曲度相符，有 2 个漩涡时反流位于其间，1 个漩涡时反流位于缺失漩涡周围；大部分升主动脉瘤患者反流开始时间明显早于漩涡达到峰值时，而健康志愿者漩涡达到峰值后才出现反流，证实了 4D flow MRI 对复杂血流的可视化能力较强。

2.3　扫描时间　缩短 MR 扫描时间有助于临床工作。2D PC MR 单次扫描时间小于 4D flow MR，但若单一层面无法覆盖全部目标时，需行多次扫描，且需要由经验丰富的操作员选择测量面，较为耗时。4D flow MR 仅需较短的扫描时间即可完成临床工作流程[12]。ORITA 等[13]对接受颅内外搭桥术患者分别于术前、术后行 4D flow MR 颈内动脉和基底动脉扫描评估血流动力学改变，用时仅 6 min，证实 4D flow MR 可在较短时间内完成扫描，并定量测量血流动力学参数，有助于提高临床工作效率。

2.4　临床应用　4D flow MRI 因其获取三维数据和可视化能力、较好的可重复性和较小的观察者间差异而被用于临床诊断 IA 和相关研究。SCHNELL 等[14]以 4D flow MRI 评估 18 例 IA 患者共 19 个动脉瘤，观察动脉瘤大小和形态对血流动力学的影响，发现囊状动脉瘤涡度和 WSS 较高，其中小型囊状动脉瘤血流速度、涡度和 WSS 较高，而大型囊状动脉瘤峰值血液流速较高，通过这些血流动力学参数可区分囊状动脉瘤与梭状动脉瘤，而 4D flow MRI 可评估不同动脉瘤的血流动力学。FUTAMI 等[15]采用 4D flow MRI 评估 35 例患者共 40 个 IA，通过对比破裂与未破裂 IA 的血流，发现 IA 内复杂、不稳定涡流可能增加其破裂风险；4D flow MRI 可用于检测复杂血流，并通过三维可视化直观加以展现。HOPE 等[16]以 4D flow MRI 对比观察 2 例颅内狭窄患者与 2 例 IA 患者的血液流场，发现通过 10 min 快速 4D flow MRI 亦可准确获得颅内血管疾病、尤其是颅内狭窄和 IA 的血流速度。以上研究结果均证实 4D flow MRI 技术有助于评估 IA 破裂风险。

4D flow MRI 也可用于评估预后。SU 等[17]对 41 例血流导向装置（flow diverter，FD）植入术后 IA 患者行 4D flow MR 检查，观察其血流动力学参数并进行

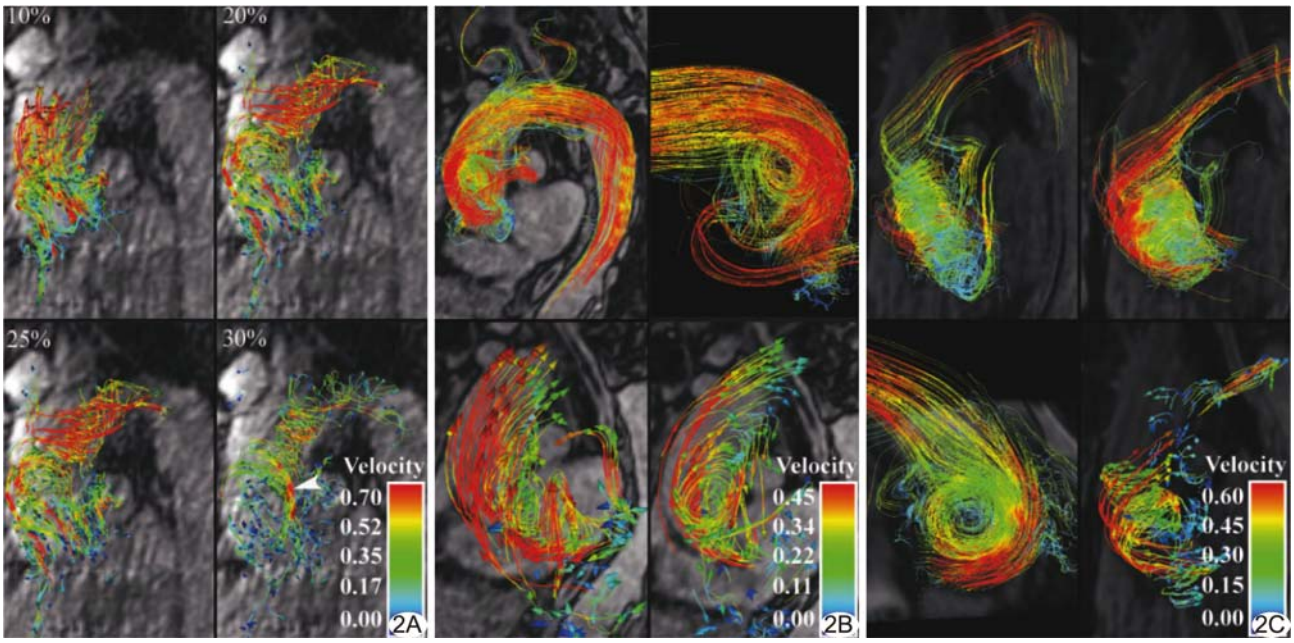


图 2　升主动脉瘤患者的粒子轨迹和流线图[11]　A. 强化螺旋流型；B. 最常见血流模式；C. 较慢外围流和较快中心流

长期追踪,发现病变处血管横截面积、收缩期流率和收缩期流入面积越大,闭塞时间越长。PEREIRA 等[18]对 10 例植入 FD 的 IA 患者行 4D flow MR 检查,并通过流线图展现 IA 血流模式,发现 1 例 FD 植入前、后血流模式发生改变,植入 FD 后 IA 内血流速度明显下降,流速减少率由 34.6%升至 71.1%。BRINA 等[19]以 4D flow MRI 获取 23 例患者植入 FD 前、后的 IA 血流速度矢量场,随访发现 6 个月后 IA 闭塞率为 60.9%,12 个月为 82.6%;分析数据发现植入 FD 后 IA 血流速度减少率和 IA 闭塞时间相关,认为 4D flow MRI 可用于描述植入 FD 后 IA 内血流变化。上述研究初步证实了 4D flow MRI 评估 IA 预后的可行性。

3　小结

4D flow MRI 可全面评估血流动力学,定量获取多方向血流数据,三维可视化复杂血流,可靠性和可重复性已获证明,并已用于临床评估脑血管、心血管等的血流动力学;但其扫描时间较长,对小血管分辨率不足,且对设备要求较高。4D flow MRI 与多普勒超声、2D PC MRI 等技术相结合,可提供更多精确数据,提高评估 IA 破裂风险和预后的准确性。

[参考文献]

[1] MARKL M, SCHNELL S, WU C, et al. Advanced flow MRI: Emerging techniques and applications[J]. Clin Radiol, 2016, 71(8):779-795.

[2] MARKL M, FRYDRYCHOWICZ A, KOZERKE S, et al. 4D flow MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2012, 36(5):1015-1036.

[3] 刘东婷,刘家祎,温兆赢,等.4D Flow MRI 对主动脉夹层患者腹部血流模式的定量研究及评估[J].放射学实践,2017,32(4):388-394.

[4] BOCK J, FRYDRYCHOWICZ A, LORENZ R, et al. In vivo noninvasive 4D pressure difference mapping in the human aorta: Phantom comparison and application in healthy volunteers and patients[J]. Magn Reson Med, 2011, 66(4):1079-1088.

[5] SUQIN L, MINGLI Z, SHITENG S, et al. Assessment of the hemodynamics of autogenous arteriovenous fistulas with 4D phase contrast-based flow quantification MRI in dialysis patients[J]. J Magn Reson Imaging, 2020, 51(4):1272-1280.

[6] BERG P, STUCHT D, JANIGA G, et al. Cerebral blood flow in a healthy Circle of Willis and two intracranial aneurysms: Computational fluid dynamics versus four-dimensional phase-contrast magnetic resonance imaging[J]. J Biomech Eng, 2014, 136(4):1364-1365.

[7] FROLOV S V, SINDEEV S V, KIRSCHKE J S, et al. CFD and MRI studies of hemodynamic changes after flow diverter implantation in a patient-specific model of the cerebral artery[J]. Experiments in Fluids, 2018, 59(11):176-192.

[8] NGO M T, KIM C I, JUNG J, et al. Four-dimensional flow magnetic resonance imaging for assessment of velocity magnitudes and flow patterns in the human carotid artery bifurcation: Comparison with computational fluid dynamics[J]. Diagnostics (Basel), 2019, 9(4):223.

[9] ISODA H, OHKURA Y, KOSUGI T, et al. Comparison of hemodynamics of intracranial aneurysms between MR fluid dynamics using 3D cine phase-contrast MRI and MR-based computational fluid dynamics[J]. Neuroradiology, 2010, 52(10):913-920.

[10] van der GEEST R J, GARG P. Advanced Analysis Techniques for Intra-cardiac Flow Evaluation from 4D Flow MRI[J]. Curr Radiol Rep, 2016, 4:38.

[11] HOPE T A, MARKL M, WIGSTROM L, et al. Comparison of flow patterns in ascending aortic aneurysms and volunteers using four-dimensional magnetic resonance velocity mapping[J]. J Magn Reson Imaging, 2010, 26(6):1471-1479.

[12] ANDO T, SEKINE T, MURAI Y, et al. Multiparametric flow analysis using four-dimensional flow magnetic resonance imaging can detect cerebral hemodynamic impairment in patients with internal carotid artery stenosis[J]. Neuroradiology, 2020, 62(11):1421-1431.

[13] ORITA E, MURAI Y, SEKINE T, et al. Four-dimensional flow MRI analysis of cerebral blood flow before and after high-flow extracranial-intracranial bypass surgery with internal carotid artery ligation[J]. Neurosurgery, 2019, 85(1):58-64

[14] SCHNELL S, ANSARI S A, VAKIL P, et al. Three-dimensional hemodynamics in intracranial aneurysms: Influence of size and morphology[J]. J Magn Reson Imaging, 2014, 39(1):120-131.

[15] FUTAMI K, UNO T, MISAKI K, et al. Identification of vortex cores in cerebral aneurysms on 4D Flow MRI[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2019, 40(12):2111-2116.

[16] HOPE T A, HOPE M D, PURCELL D D, et al. Evaluation of intracranial stenoses and aneurysms with accelerated 4D flow[J]. Magn Reson Imaging, 2010, 28(1):41-46.

[17] SU T, REYMONE P, BRINA O, et al. Large neck and strong ostium inflow as the potential causes for delayed occlusion of unruptured sidewall intracranial aneurysms treated by flow diverter[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2020, 41(3):488-494.

[18] PEREIRA V M, BRINA O, DELATTRE B M, et al. Assessment of intra-aneurysmal flow modification after flow diverter stent placement with four-dimensional flow MRI: A feasibility study[J]. J Neurointerv Surg, 2015, 7(12):913-919.

[19] BRINA O, BOUILLOT P, REYMOND P, et al. How flow reduction influences the intracranial aneurysm occlusion: A prospective 4D phase-contrast MRI study[J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2019, 40(12):2117-2123.