

基于磁共振成像的颈动脉粥样硬化斑块局部血流动力学平台研究

荆利娜 高培毅 林燕 隋滨滨 薛静 秦海强 王辉

【摘要】 目的 建立颈动脉 MRI 和计算流体力学相结合的研究平台,分析颈动脉粥样硬化斑块结构学和血流动力学改变,以探讨血流动力学因素在斑块稳定性评价中的价值。**方法** 共 13 例颈动脉粥样硬化性脑血管病患者接受颈动脉 MRI 和增强磁共振血管成像检查,根据斑块形态分析斑块周围血流动力学参数变化。**结果** 共检出颈内动脉粥样硬化斑块 15 例次,IV ~ V 型 5 例次、VI 型 8 例次、VII 型 1 例次、VIII 型 1 例次。斑块周围血流动力学参数分别为管壁切应力(79.86 ± 57.83) Pa、静态压(-7586.81 ± 9313.83) Pa、血流速度(2.76 ± 1.81) m/s,与正常对照组相比,斑块周围管壁切应力呈不均匀升高、静态压不均匀下降,斑块邻近血流为层流、呈喷射状,血流速度明显增加,且差异具有统计学意义(均 $P = 0.000$)。**结论** 颈动脉 MRI 与计算流体力学相结合可以实现对颈动脉粥样硬化斑块结构学和血流动力学的综合分析,从而揭示了血流动力学因素可以影响颈动脉粥样硬化斑块的发展和稳定性。

【关键词】 颈动脉; 动脉硬化; 血流动力学; 磁共振成像; 磁共振血管造影术

Assessment of hemodynamic changes near carotid atherosclerotic plaques by using magnetic resonance imaging and computational fluid dynamics

JING Li-na¹, GAO Pei-yi², LIN Yan¹, SUI Bin-bin², XUE Jing², QIN Hai-qiang³, WANG Hui¹

¹Department of Radiology, ²Department of Neurology, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing Key Laboratory of Magnetic Resonance Imaging and Brain Informatics, Beijing 100050, China

³Beijing Neurosurgical Institute, Beijing 100050, China

Corresponding author: GAO Pei-yi (Email: cjr.gaopeiyyi@vip.163.com)

【Abstract】 Objective To establish a platform by using carotid MRI and computational fluid dynamics (CFD) to assess hemodynamic changes around carotid atherosclerotic plaques. **Methods** Thirteen patients with carotid atherosclerosis were recruited in this study. Six volunteers were regarded as normal controls. All the patients and volunteers underwent carotid MRI and contrast-enhanced magnetic resonance angiography (CEMRA). Carotid MRI was used to visualize the plaque structures and components. All plaques were divided into different types according to plaque components. CEMRA images were used to obtain three-dimensional (3D) models of carotid bifurcations, whose boundary conditions were specified using CFD front-end software, and then the mesh file of the 3D models were obtained to import to CFD software to visualize hemodynamic maps, including wall shear stress (WSS), static pressure and blood velocity. **Results** Fifteen diseased internal carotid arteries (ICAs) were assessed. According to the MRI appearance of the plaques, the types of these plaques were from IV - V to VIII. All of these were vulnerable plaques which caused irregular stenosis of ICAs. The WSS, static pressure and blood velocity were (79.86 ± 57.83) Pa, (-7586.81 ± 9313.83) Pa, (2.76 ± 1.81) m/s, respectively in the diseased ICAs group and (2.52 ± 0.58) Pa, (-71.65 ± 30.89) Pa, (0.21 ± 0.06) m/s, respectively in the normal control group. In the diseased ICAs group WSS was elevated heterogenously and static pressure was decreased heterogenously near the plaques. The blood velocity near the plaques was increased but still streamlined. Statistical significant differences were shown for WSS, static pressure and blood velocity between 2 groups ($P = 0.000$, for all).

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2014.07.011

基金项目:国家自然科学基金资助项目(项目编号:81301193);北京市自然科学基金资助项目(项目编号:7122029);北京市自然科学基金资助项目(项目编号:7133238)

作者单位:100050 首都医科大学附属北京天坛医院放射科 磁共振成像脑信息学北京市重点实验室(荆利娜、林燕、王辉),神经内科(秦海强);100050 北京市神经外科研究所(高培毅、隋滨滨、薛静)

通讯作者:高培毅(Email:cjr.gaopeiyyi@vip.163.com)

Conclusions The platform combining MRI and CFD can be used to analyze the plaque structures and fluid dynamic change near the plaques, suggesting hemodynamics plays an important role in the plaque progression and vulnerability.

【Key words】 Carotid arteries; Arteriosclerosis; Hemodynamics; Magnetic resonance imaging; Magnetic resonance angiography

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 81301193) and Natural Science Foundation of Beijing (No. 7122029, 7133238).

颈动脉粥样硬化是缺血性卒中的首要危险因素,而血流动力学改变是其重要影响因素之一^[1]。血管内局部血流动力学异常改变可以通过各种机制直接或间接引起动脉壁结构变化^[2]。采用计算流体力学(CFD)的方法可以模拟在体血管的血流动力学状态,进而评价颈动脉流体力学改变^[3-4]。但是该项方法仅能反映血管内的血流状态,无法结合动脉粥样硬化斑块成分和形态进行分析。随着影像技术的进步,MRI和超声检查已经成为目前评价颈动脉粥样硬化斑块成分的常用工具。其中,以超声技术最早应用于动脉粥样硬化斑块的评价,但Krasinski等^[5]发现,与MRI相比,采用超声技术计算血管壁厚度时,由于存在分辨力低、超声成像角度不同而易导致扫描层面偏斜。而MRI能够克服上述问题,并以其良好的可重复性^[6]在体评价颈动脉粥样硬化斑块成分和形态、识别斑块破裂与否^[7]。因此,采用MRI和计算流体力学相结合的方法分析颈动脉粥样硬化斑块成分,可综合斑块结构学与血流动力学信息,显示斑块局部血流动力学改变,从而评价血流动力学因素在斑块易损性中的作用。

对象与方法

一、观察对象

本研究经首都医科大学附属北京天坛医院道德伦理委员会审核批准,所有受试者均对本研究目的、观察方法和对比剂不良反应知情,并签署知情同意书。

1. 纳入标准 (1)年龄18~80岁。(2)影像学检查证实存在颈动脉粥样硬化斑块。(3)斑块分型为IV~V型及以上且颈动脉呈中至重度狭窄。

2. 排除标准 (1)粥样硬化斑块分型I~II和III型患者。(2)颈动脉完全闭塞患者。(3)非动脉粥样硬化性病变引起的颈动脉狭窄患者。(4)有MRI检查禁忌证患者。(5)对比剂过敏患者。(6)肾功能障碍患者。(7)由任何原因导致的无法承受或配合

MRI检查的患者。

3. 一般资料 根据纳入与排除标准,共选择2009年4月-2010年12月首都医科大学附属北京天坛医院神经内科诊断与治疗的动脉粥样硬化性脑血管病(包括缺血性卒中、短暂性脑缺血发作、脑血管狭窄或颅外血管狭窄)患者13例,男性11例,女性2例;年龄50~74岁,平均 (66.17 ± 8.13) 岁。同时选择6例同期在我院进行体格检查的健康志愿者作为正常对照组,均为男性,年龄22~51岁,平均 (36 ± 9.84) 岁。

二、观察方法

1. 仪器与设备 本研究所用检查设备为德国Siemens公司生产的Trio Tim 3.0T MRI扫描仪,最大切换率 $200 \text{ T}/(\text{m} \cdot \text{ms})$ 、最大梯度强度 $45 \text{ mT}/\text{m}$ 。采用荷兰Machnet BV公司生产的颈动脉专用四通道表面线圈和德国Siemens公司生产的头颈部联合表面线圈。

2. MRI检查 受试者仰卧位,下颌稍抬起以显露双侧颈部,颈动脉专用四通道表面线圈置于颈部、缚带固定,连接指脉门控,带激光侧对准食指腹侧。扫描中心设定为颈动脉分叉部,垂直于血管进行横断面扫描,颈动脉分叉部上下各 2 cm 。(1)三维时间飞跃(3D-TOF)血管成像:重复时间(TR) 21 ms 、回波时间(TE) 3.84 ms ,翻转角(FA) 25° ,扫描视野(FOV) $14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$,矩阵 320×240 ,层厚 1 mm ,激励次数(NEX)为1次,空间分辨率为 $0.40 \text{ mm} \times 0.40 \text{ mm}$ 。(2) $T_2\text{WI}$ 序列:采用快速自旋回波(TSE)序列并通过压脂技术抑制皮下脂肪信号,重复时间 3000 ms 、回波时间 65 ms ,扫描视野 $14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$,矩阵 320×240 ,层厚 2 mm ,激励次数2次,空间分辨率 $0.50 \text{ mm} \times 0.50 \text{ mm}$ 。(3)质子密度加权像(PDWI):采用TSE序列并经压脂技术抑制皮下脂肪信号,重复时间 3000 ms 、回波时间 13 ms ,扫描视野 $14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$,矩阵 320×240 ,层厚 2 mm ,激励次数2次,空间分辨率 $0.40 \text{ mm} \times 0.40 \text{ mm}$ 。(4) $T_1\text{WI}$:采用黑血(双

翻转恢复)TSE 序列和指脉门控,以及压脂技术抑制皮下脂肪信号,重复时间 750 ms、回波时间 12 ms,扫描视野 14 cm × 14 cm,矩阵 320 × 240,层厚 2 mm,激励次数为 2 次,空间分辨率 0.40 mm × 0.40 mm。(5)结果判断:由一位高年资放射科医师分析颈动脉粥样硬化斑块在上述序列的不同信号强度,以判断斑块成分^[7-8],并根据其信号强度差异进行斑块分型^[9]。I ~ II 型,血管壁略增厚,无钙化;III 型,弥漫性内膜增厚或呈小的偏心斑块,无钙化;IV ~ V 型,纤维帽下可见坏死脂质核,可能有钙化;VI 型,复杂斑块,可能存在表面缺陷、出血或血栓形成;VII 型,呈钙化斑块;VIII 型,呈纤维斑块,无脂质核,可能有小的钙化灶。

3. 颈动脉增强磁共振血管成像 (1)检查方法:采用头颈部联合表面线圈行颈动脉增强磁共振血管成像(CEMRA)。颈动脉分叉部扫描范围自颈动脉起始部至颈内动脉岩骨段,先行冠状位扫描作为减影蒙片,然后采用高压注射器经肘正中静脉以 3 ml/s 流速注射对比剂 30 ml,再追加 15 ml 生理盐水冲管。重复时间 2.73 ms、回波时间 1.15 ms,翻转角 25°,扫描视野 40 cm × 40 mm,矩阵 512 × 352,层厚 0.80 mm,共扫描 96 层。以增强扫描获得的原始冠状位图像与蒙片进行减影,消除颈部软组织信号,并通过颈动脉分叉部血管的最大密度投影(MIP)重建获得三维图像。颈动脉狭窄测量方法依据北美症状性颈动脉内膜切除术试验(NASCET)标准,狭窄率(%) = (A - B) / A × 100%,其中 A 为狭窄后相对正常的远心端管腔直径、B 为最狭窄处残留管腔直径^[10]。(2)图像后处理:将颈动脉分叉部 CEMRA 经减影后的 DICOM 图像导入计算机,采用医学图像后处理软件重建颈动脉,获得颈动脉分叉部血管三维模型,导入计算流体力学前处理器软件划分计算网格,并设置该段血管各项边界条件,即指定颈总动脉横断面为血流入口、颈外动脉和颈内动脉横断面为血流出口、血管壁为壁面、血管内血流为流体,最后导出网络文件^[4]。(3)计算流体力学:将上述网格文件导入计算流体力学软件,首先对导入的网格文件进行检查并进行网格优化、平滑和交换。分别将颈动脉管壁设为光滑和无渗透性的刚性管壁;颈动脉血流为不可压缩的牛顿流体,流动状态设定为非定常流,血液密度设定为 1050 kg/m³、血液黏稠度为 3.50 × 10⁻³ kg/ms。任何流体均遵循质量和能量守恒定律,经连续方程和 Navier-Stokes 方程计算,颈内动

脉和颈外动脉血流量分别设为 55% 和 45%;假设血液流动于出口处以充分发展,流动方向上无梯度变化,管壁上速度取无滑移边界条件、管壁面上速度为零。进行流体力学计算时,将入口初始速度定义为用户自定义函数,选择非耦合求解方法和隐式计算方法,空间属性为三维空间,选择绝对速度求解方式,采用 Simple 方法以二阶迎风格式计算管壁切应力、静态压和血流速度等血流动力学指标^[4],获得该区域之管壁切应力、静态压和血流速度矢量图和数值。

4. 统计分析方法 采用 SPSS 16.0 统计软件进行数据计算与分析。计量资料以均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,两组患者颈动脉管壁切应力、静态压和血流速度的比较,行非参数资料的 Mann-Whitney *U* 检验。以 $P \leq 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

本组 13 例患者中 3 例行双侧颈动脉筛查、10 例行单侧颈动脉筛查,共检出颈内动脉粥样硬化斑块 16 例次(16 支血管),其中 1 例次颈动脉管壁切应力和静态压升高区域位于正常管壁侧,未纳入本研究。最终共计获得颈内动脉粥样硬化斑块 15 例次(右侧 7 例次、左侧 8 例次),根据信号强度进行斑块成分分型:IV ~ V 型 5 例次、VI 型 8 例次、VII 型 1 例次、VIII 型 1 例次。

正常对照组受试者颈内动脉球部中央血流较快,呈层流,外侧管壁局部血流速度减慢,出现回流和涡流;颈内动脉球部外侧管壁局部可见较低切应力区域,静态压分布尚均匀(图 1)。与正常对照组相比,颈动脉粥样硬化组患者颈内动脉粥样硬化斑块导致管腔局部呈不规则狭窄,斑块周围管壁切应力不均匀升高、静态压不均匀下降,斑块邻近区域血流表现为层流,呈喷射状流向斑块远侧,流速明显增加(图 2,3)。两组受试者颈内动脉管壁切应力、静态压和血流速度比较,组间差异具有统计学意义(均 $P = 0.000$,表 1);颈动脉粥样硬化组患者颈内动脉粥样硬化斑块远端静态压略下降,局部管腔扩张,并可见局部低切应力和涡流区。

讨 论

一、基于 MRI 的颈动脉血流动力学研究平台的建立

以往的血流动力学研究主要基于理想化的血

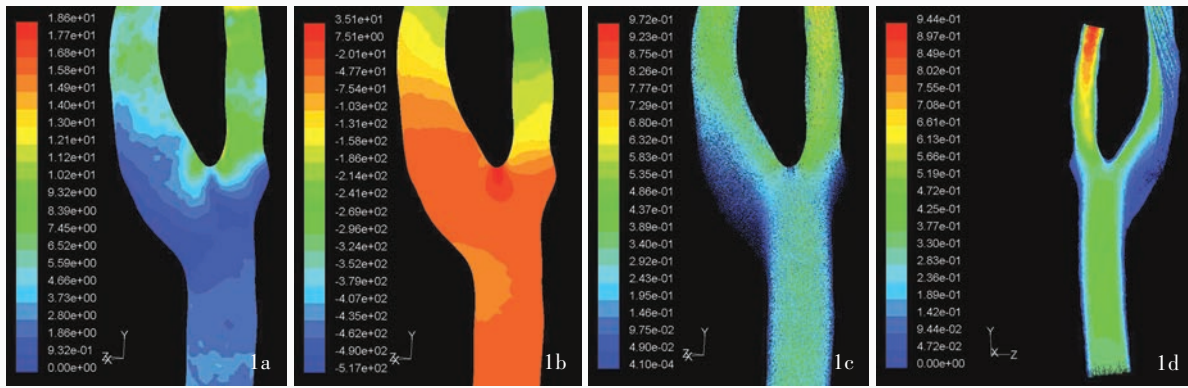


图 1 正常对照组受试者颈动脉分叉部血流动力学观察显示,颈内动脉球部中央血流较快,呈层流,外侧局部血流速度减慢,出现回流和涡流;颈内动脉球部外侧壁局部可见较低切应力区域,静态压分布尚均匀 1a 管壁切应力图 1b 静态压图 1c 流速图 1d 流线图

Figure 1 In the normal control group, flow at the carotid bifurcation was predicted to split into two relatively high-velocity laminar streams in the center part of the vessel. But at the lateral carotid bulb, there were regions of slow recirculation and whirlpool. There was a large region of low WSS in the lateral wall of carotid bulb, and the distribution of static pressure was almost homogeneous. WSS (Panel 1a). Static pressure (Panel 1b). Velocity profile (Panel 1c). Pathline map (Panel 1d).

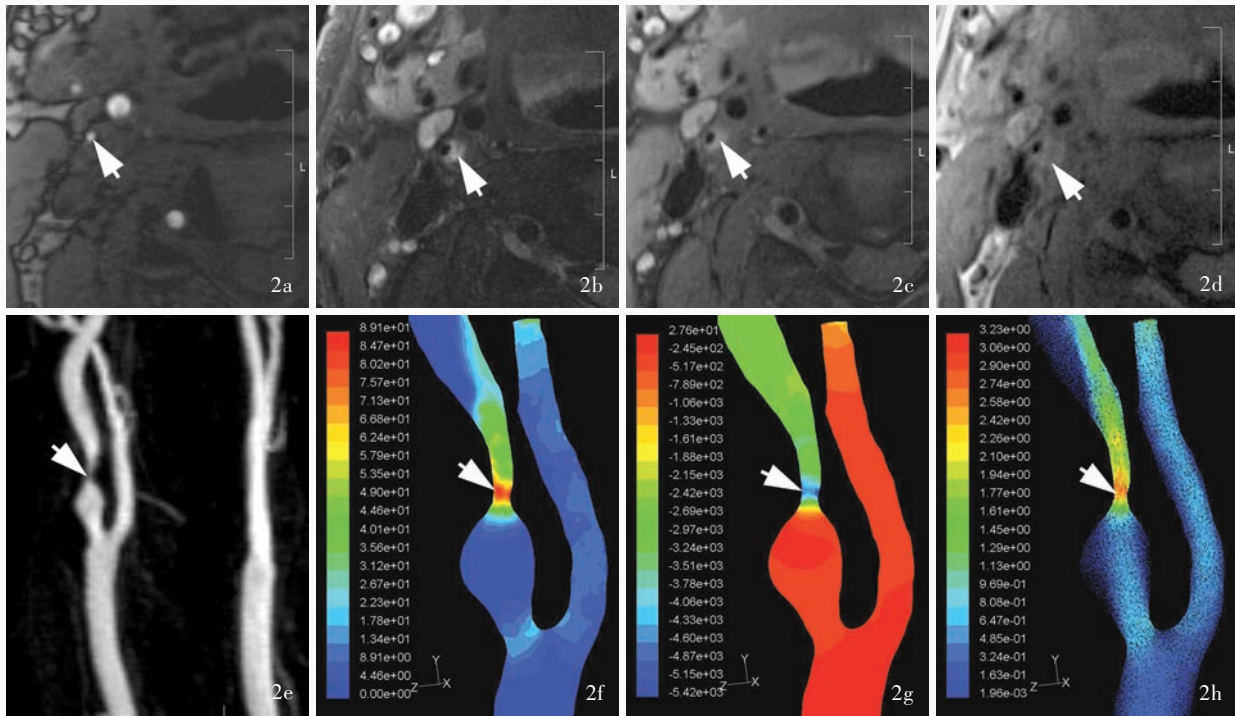


图 2 男性患者,66 岁,以颅外动脉狭窄入院 2a~2d 3D-TOF、T₂WI、PDWI、T₁WI 显示,右侧颈内动脉粥样硬化斑块内坏死脂质核及完整的纤维帽形成(箭头所示),斑块分型为 IV~V 型 2e MRA 显示,斑块导致颈内动脉局部血管狭窄(箭头所示) 2f 管壁切应力图显示,斑块周围切应力呈不均匀增强(箭头所示)、远端略下降 2g 静态压图显示,斑块周围静态压呈不均匀下降(箭头所示)、远端略下降 2h 流速图显示,斑块邻近区域血流速度明显加快并呈层流(箭头所示),远端呈涡流

Figure 2 A 66-year-old male was diagnosed as extracranial carotid stenosis. Carotid MRI (3D-TOF, T₂WI, PDWI and T₁WI) showed a plaque with lipid-rich necrotic core and intact fibrous cap in the right internal carotid artery (arrows indicate), which was a type IV-V lesion of MRI classification (Panel 2a-2d). MRA showed luminal stenosis caused by this plaque (arrow indicates, Panel 2e). WSS was elevated heterogeneously around the plaque (arrow indicates) but decreased slightly at the distal side of stenosis (Panel 2f). Static pressure was decreased heterogeneously around the plaque (arrow indicates) and decreased slightly at the distal side of stenosis (Panel 2g). Velocity map showed velocity near the plaque was prominently elevated, but still streamlined (arrow indicates), while significant whirlpool was demonstrated at the distal side of stenosis (Panel 2h).

管几何模型或动物模型^[11],这些方法均无法直接反映人体血流动力学状态。对颈动脉分叉部的三维

血流进行模拟时,血管几何模型须是个体的颈动脉三维实体,在本研究中,我们采用 CEMRA 获得颈

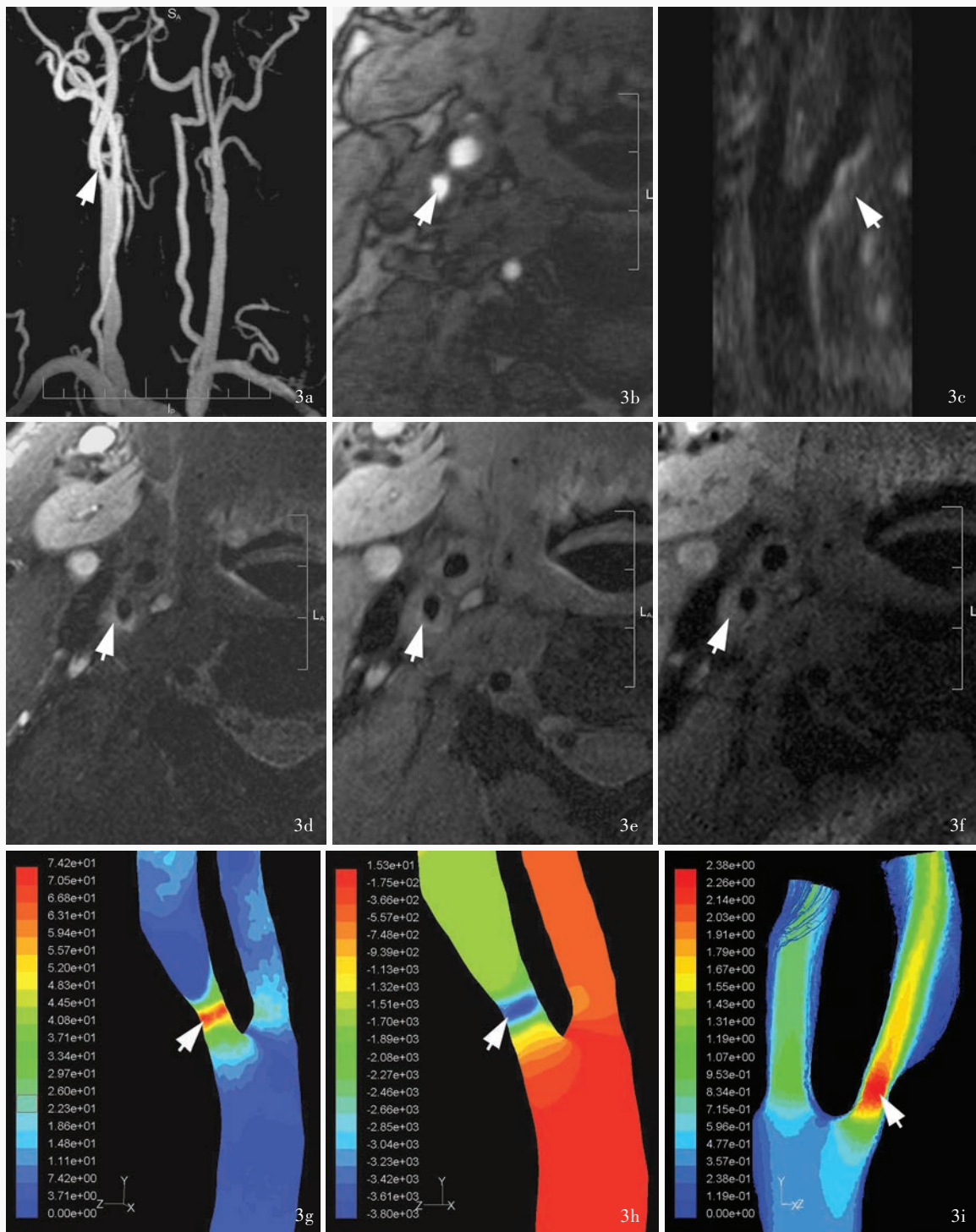


图 3 男性患者, 49 岁, 以短暂性脑缺血发作入院 3a MRA 显示, 斑块导致颈内动脉局部血管狭窄(箭头所示) 3b~3f 3D-TOF、T₂WI-MPR、T₂WI、PDWI、T₁WI 显示, 右侧颈内动脉粥样硬化斑块内坏死脂质核及完整的纤维帽形成(箭头所示), 斑块分型为 IV~V 型 3g 管壁切应力图显示, 斑块周围切应力呈不均匀增强(箭头所示), 远端略下降 3h 静态压图显示, 斑块周围静态压呈不均匀下降(箭头所示), 远端略下降 3i 流线图显示, 斑块邻近区域流速明显加快并呈层流(箭头所示), 远端呈涡流

Figure 3 A 49-year-old male was diagnosed as transient ischemic attack. MRA showed focal stenosis caused by carotid plaque (arrow indicates, Panel 3a). Carotid MRI (3D-TOF, T₂WI-MPR, T₂WI, PDWI and T₁WI) showed a plaque with lipid-rich necrotic core and intact fibrous cap in the right internal carotid artery (arrows indicate), which was a type IV-V lesion of MRI classification (Panel 3b-3f). WSS was elevated heterogeneously around the plaque (arrow indicates) but decreased slightly at the distal side of stenosis (Panel 3g). Static pressure was decreased heterogeneously around the plaque (arrow indicates) and decreased slightly at the distal side of stenosis (Panel 3h). Pathline map showed velocity near the plaque was elevated, but still streamlined (arrow indicates), while whirlpool was demonstrated at the distal side of stenosis (Panel 3i).

表 1 两组受试者血流动力学参数的比较($\bar{x} \pm s$)

Table 1. Comparison of hemodynamic parameters between the diseased ICAs group and the normal control group ($\bar{x} \pm s$)

Group	N	WSS (Pa)	Static pressure (Pa)	Blood velocity (m/s)
Control	7	2.52 ± 0.58	-71.65 ± 30.89	0.21 ± 0.06
Diseased ICAs	14	79.86 ± 57.83	-7586.81 ± 9313.83	2.76 ± 1.81
U value		0.000	0.000	0.000
P value		0.000	0.000	0.000

ICAs, internal carotid arteries, 颈内动脉; WSS, wall shear stress, 管壁切应力

动脉分叉部解剖学影像,但在 MRI 上仅能获得颈动脉二维 DICOM 图像,如何将颈动脉分叉部的二维影像重建成计算流体力学所需的三维血管几何实体,需通过其他计算机后处理软件来实现^[12]。计算流体力学可结合其他影像学技术,如 CTA^[13-14]、DSA^[13]等,以实现复杂血管模型血流模拟,但由于 CTA 和 DSA 对动脉粥样硬化斑块的识别能力较低,尚不足以评价斑块易损性。而 MRI 则是斑块成像的理想方法,采用多个不同的序列可以对血管形态进行定量分析,同时能够识别斑块成分^[7,15]。因此,我们通过颈动脉 MRI 检查与计算流体力学相结合的方法建立斑块评价平台,从斑块结构学和血流动力学两方面对斑块易损性进行评价。

计算流体力学技术是利用计算机与离散化的数值方法对流体动力学问题进行数值模拟分析,与影像学检查技术相结合,获得传统医学试验难以测量的指标,如速度矢量、流线和管壁切应力等流动特性参数^[14]。数字模型越符合人体解剖特征,所反映的变化越真实可信。在本研究中,我们采用 CRMRA 图像重建模型,准确地模拟了颈动脉分叉部管腔结构和血流动力学变化,根据超声所测得的速度分布图,采用 C 语言编辑速度函数,划分网格时采用非结构三维四面体混合网格 Tet/Hybrid 技术。这种网格的生成过程比较复杂但有良好的适应性,尤其对具有复杂边界的流场计算十分有效,选用分离式隐式求解器解决不可压缩流动,采用 Simple 方法以二阶迎风格式计算,可以提高复杂流动的计算精度,减少离散误差^[16]。经过计算获得颈动脉分叉部的血流速度,以及血流动力学参数大小、方向和分布情况后,通过图像和数值的方式将计算域上的结果表示出来。

二、血流动力学对颈动脉粥样硬化斑块的影响

Frauenfelder 等^[17]利用计算流体力学的方法分析冠状动脉粥样硬化性病变周围血流动力学变化,发现狭窄段管壁压力下降、切应力增加、血流速度增快,与本研究结果相一致。Fukumoto 等^[18]利用三维血管内超声对 20 例急性冠状动脉综合征患者进行分析,发现切应力局部增加与斑块破裂相关。相对于人们对切应力的关注,关于压力对斑块影响的相关研究极少且结果尚存争议。Fukumoto 等^[18]研究发现,斑块周围压力上升,而根据 Bernoulli 公式,血管狭窄处血流速度增加可引起局部压力下降。本研究所纳入的动脉粥样硬化性脑血管病患者狭窄管腔周围局部静态压明显下降,与 Li 等^[19]的研究结果一致。狭窄段血管血流速度增加可使局部静态压下降,从而引起局部血管变形重塑,从而影响斑块之稳定性^[20]。

颈动脉粥样硬化斑块远端管腔局部扩张,并可见低切应力区域及涡流、回流等现象。一方面,在低切应力区域和内皮细胞凋亡区域,血小板源性生长因子(PDGF)生成增加,并与炎症因子相结合,使具有基质生成作用的合成型平滑肌细胞得以存活并保持活性^[21]。另一方面,斑块下游血流紊乱可以促进血小板聚集和激活,使脂质成分渗透并在内膜下聚集^[22],导致局部血栓形成,促进斑块远端动脉粥样硬化进展。

本研究有其局限性。第一,样本量较小,目前仅初步揭示了颈动脉粥样硬化斑块周围管壁切应力、静态压及血流速度的变化。由于斑块形态、结构多种多样,尚待大样本临床试验证据加以验证。第二,尽管大量文献证实多序列 MRI 技术能够识别斑块成分,并与病理检查结果之间具有良好的一致性^[7-9,15],且已应用于临床诊断,但本研究颈动脉粥样硬化斑块未经病理检查证实,依然是一个缺憾。

参 考 文 献

- [1] Caro CG. Discovery of the role of wall shear in atherosclerosis. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2009, 29:158-161.
- [2] Chatzizisis YS, Giannoglou GD. Shear stress and inflammation: are we getting closer to the prediction of vulnerable plaque? *Expert Rev Cardiovasc Ther*, 2010, 8:1351-1353.
- [3] Martin D, Zaman A, Hacker J, Mendelow D, Birchall D. Analysis of hemodynamic factors involved in carotid atherosclerosis using computational fluid dynamics. *Br J Radiol*, 2009, 82 Spec No 1:33-38.
- [4] Xue YJ, Gao PY, Lin Y, Duan Q. Type of flow patterns of human carotid bifurcation based on computational fluid

- dynamics and MR angiography. *Zhongguo Yi Xue Ying Xiang Ji Shu*, 2013, 29:476-479. [薛蕴菁, 高培毅, 林燕, 段青. 基于血管影像的人体颈动脉分叉血流模式分型. *中国医学影像技术*, 2013, 29:476-479.]
- [5] Krasinski A, Chiu B, Fenster A, Parraga G. Magnetic resonance imaging and three - dimensional ultrasound of carotid atherosclerosis: mapping regional differences. *J Magn Reson Imaging*, 2009, 29:901-908.
- [6] Li F, Yarnykh VL, Hatsukami TS, Chu B, Balu N, Wang J, Underhill HR, Zhao X, Smith R, Yuan C. Scan - rescan reproducibility of carotid atherosclerotic plaque morphology and tissue composition measurements using multicontrast MRI at 3T. *J Magn Reson Imaging*, 2009, 31:168-176.
- [7] Hatsukami TS, Yuan C. MRI in the early identification and classification of high - risk atherosclerotic carotid plaques. *Imaging Med*, 2010, 2:63-75.
- [8] Zhang XN, Wu SZ, Zhang SK. Advances in the research of high-resolution magnetic resonance imaging used for treating carotid atherosclerotic plaques in ischemic stroke patients. *Zhongguo Xian Dai Shen Jing Ji Bing Za Zhi*, 2014, 14:56-59. [张小楠, 吴世政, 张淑坤. 缺血性卒中患者颈动脉粥样硬化斑块高分辨磁共振成像研究进展. *中国现代神经疾病杂志*, 2014, 14:56-59.]
- [9] Cai JM, Hatsukami TS, Ferguson MS, Small R, Polissar NL, Yuan C. Classification of human carotid atherosclerotic lesions with in vivo multicontrast magnetic resonance imaging. *Circulation*, 2002, 106:1368-1373.
- [10] Killickap G, Ergun E, Basbay E, Kosar P, Kosar U. Carotid stenosis evaluation by 64-slice CTA: comparison of NASCET, ECST and CC grading methods. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2011, 28:1257-1266.
- [11] van Bochove GS, Straathof R, Krams R, Nicolay K, Strijkers GJ. MRI - determined carotid artery flow velocities and wall shear stress in a mouse model of vulnerable and stable atherosclerotic plaque. *MAGMA*, 2010, 23:77-84.
- [12] Piccinelli M, Veneziani A, Steinman DA, Remuzzi A, Antiga L. A framework for geometric analysis of vascular structures: application to cerebral aneurysms. *IEEE Trans Med Imaging*, 2009, 28:1141-1155.
- [13] Geers AJ, Larrabide I, Radaelli AG, Bogunovic H, Kim M, Gratama van Andel HA, Majoie CB, VanBavel E, Frangi AF. Patient - specific computational hemodynamics of intracranial aneurysms from 3D rotational angiography and CT angiography: an in vivo reproducibility study. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011, 32:581-586.
- [14] Zhang T, Xiong J, Hu XZ, Jia X, Luan SL, Guo W. Application of computational fluid dynamics in hemodynamic research of aortic arch. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2013, 93:380-384. [张韬, 熊江, 胡小忠, 贾鑫, 栾韶亮, 郭伟. 计算流体力学技术在主动脉弓血流动力学研究中的应用价值. *中华医学杂志*, 2013, 93:380-384.]
- [15] Yuan C, Wang J, Balu N. High - field atherosclerotic plaque magnetic resonance imaging. *Neuroimaging Clin N Am*, 2012, 22:271-284.
- [16] Xue YJ, Gao PY, Duan Q, Lin Y, Dai CB. Preliminary study of hemodynamic distribution in patient - specific stenotic carotid bifurcation by image-based computational fluid dynamics. *Acta Radiol*, 2008, 49:558-565.
- [17] Frauenfelder T, Boutsianis E, Schertler T, Husmann L, Leschka S, Poulikakos D, Marincek B, Alkadhi H. In - vivo flow simulation in coronary arteries based on computed tomography datasets: feasibility and initial results. *Eur Radiol*, 2007, 17:1291-1300.
- [18] Fukumoto Y, Hiro T, Fujii T, Hashimoto G, Fujimura T, Yamada J, Okamura T, Matsuzaki M. Localized elevation of shear stress is related to coronary plaque rupture: a 3 - dimensional intravascular ultrasound study with in - vivo color mapping of shear stress distribution. *J Am Coll Cardiol*, 2008, 51:645-650.
- [19] Li ZY, Taviani V, Tang T, Sadat U, Young V, Patterson A, Graves M, Gillard JH. The mechanical triggers of plaque rupture: shear stress vs pressure gradient. *Br J Radiol*, 2009, 82 Spec No 1:39-45.
- [20] Li ZY, Taviani V, Gillard JH. The impact of wall shear stress and pressure drop on the stability of the atherosclerotic plaque. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2008, 2008:1373-1376.
- [21] Chatzizisis YS, Coskun AU, Jonas M, Edelman ER, Feldman CL, Stone PH. Role of endothelial shear stress in the natural history of coronary atherosclerosis and vascular remodeling: molecular, cellular, and vascular behavior. *J Am Coll Cardiol*, 2007, 49:2379-2393.
- [22] Willett NJ, Long RC Jr, Maiellaro-Rafferty K, Sutliff RL, Shafer R, Oshinski JN, Giddens DP, Guldberg RE, Taylor WR. An in vivo murine model of low - magnitude oscillatory wall shear stress to address the molecular mechanisms of mechanotransduction: brief report. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2010, 30:2099-2102.

(收稿日期:2014-05-11)

欢迎订阅 2014 年《中国现代神经疾病杂志》

《中国现代神经疾病杂志》为国家卫生和计划生育委员会主管、中国医师协会主办的神经病学类专业期刊。办刊宗旨为:理论与实践相结合、普及与提高相结合,充分反映我国神经内外科临床科研工作重大进展,促进国内外学术交流。所设栏目包括述评、专论、论著、临床病理报告、应用神经解剖学、神经影像学、综述、短篇论著、临床医学图像、学术争鸣、病例报告、临床病理(例)讨论、新技术新方法、技术改进、临床药理学查房、药物与临床、会议纪要以及国外研究动态等。

《中国现代神经疾病杂志》为国家科技部中国科技论文统计源期刊,国内外公开发行。中国标准连续出版物号:ISSN 1672-6731;CN 12-1363/R。国际大 16 开型,彩色插图,48 页,月刊,每月 25 日出版。每期定价 15 元,全年 12 册共计 180 元。2014 年仍由邮政局发行,邮发代号:6-182。请向全国各地邮政局订阅,亦可直接向编辑部订阅(免邮寄费)。

编辑部地址:天津市河西区气象台路 122 号天津市环湖医院内,邮政编码:300060。

联系电话:(022)60367623;传真:(022)60367927。