

颈动脉狭窄致脑低灌注损伤多模态 MRI

方慧, 孟凡伟, 姜洪雁, 周慧, 周勇, 曲涛

【摘要】 目的:探讨颈动脉狭窄程度与颈内动脉血流动力学参数及相关脑区 ADC 值变化的关系。方法:27 例患者经磁共振血管成像(MRA)证实有中度以上颈动脉狭窄。所有患者行颅脑常规 MRI、MRA 和 DWI 检查,并采用血流定量测量(QFlow)和彩色多普勒超声(CDFI)对颈内动脉的血流动力学参数进行分析。对 QFlow 技术与 CDFI 测量的血流参数(血流量、平均流速、峰值流速及管腔面积)及其与颈动脉狭窄程度及相关脑区的表现扩散系数值(ADC)之间的相关性行非参数检验。结果:①QFlow 技术与 CDFI 测量的血流量和平均流速呈中度正相关($r=0.695, P<0.01; r=0.795, P<0.01$),峰值流速和管腔面积呈低度正相关($r=0.453, P<0.01; r=0.573, P<0.01$)。②颈动脉狭窄程度与 QFlow 技术测量的颈内动脉流量呈低度负相关($r=-0.467, P<0.01$),与侧脑室旁前部和额叶白质的 ADC 值呈低度正相关($r=0.373, P<0.01; r=0.372, P<0.01$)。③侧脑室旁前部和额叶白质的 ADC 值与 QFlow 技术测量的颈内动脉流量分别呈中度和低度负相关($r=-0.624, P<0.01; r=-0.533, P<0.01$)。结论:多模态 MRI 能显示颈动脉狭窄所致的颈内动脉血流量减低及供血脑区的低灌注损伤, QFlow 技术能较准确评价颈内动脉血流动力学变化。

【关键词】 颈动脉; 动脉病变; 扩散加权成像; 相位对比; 磁共振成像

【中图分类号】 R543.4; R445.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2016)04-0350-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2016.04.016

Multimodal magnetic resonance imaging of chronic cerebral ischemia caused by carotid stenosis FANG Hui, MENG Fan-wei, JIANG Hong-yan, et al. Department of Radiology, the Fifth People's Hospital of Dalian, Liaoning 116021, P. R. China

【Abstract】 Objective: To explore the relationship between stenosis degree of carotid artery (CA), hemodynamic parameters of internal carotid artery (ICA) and ADC values of relevant brain regions. **Methods:** 27 patients with moderate or severe stenosis of carotid artery diagnosed by MRA underwent conventional MRI, MRA, DWI of brain and 3D QFlow, color Doppler flow imaging (CDFI) of ICA. The relationships of the hemodynamic parameters including blood flow (BF), mean velocity (MV), peak velocity (PV) and lumen area (LA) measured by QFlow and CDFI, stenosis degree of carotid artery and ADC values of relevant brain regions were analyzed by nonparametric tests. **Results:** ①Moderately positive correlations existed between the MVs (measured by 3D QFlow and CDFI) and BFs ($r=0.695, P<0.01; r=0.795, P<0.01$); low positive correlation existed between the PVs (measured by QFlow and CDFI) and LAs ($r=0.453, P<0.01; r=0.573, P<0.01$). ②Stenosis degree of CA had negative correlation with the BF measured by QFlow ($r=-0.467, P<0.01$), and positive correlation with the ADC values of anterior region of periventricular white matter and the frontal white matter ($r=0.373, P<0.01; r=0.372, P<0.01$). ③The ADC values of periventricular white matter and the frontal white matter had moderately and low negative correlation with BF ($r=-0.624, P<0.01; r=-0.533, P<0.01$). **Conclusion:** Multimodal MRI can accurately display the decrease of blood flow of internal carotid artery and hypo-perfusion area of brain, and 3D QFlow MRA is a useful technique to evaluate hemodynamics of carotid artery.

【Key words】 Artery stenosis; Diffusion-weighted imaging; Phase contrast; Magnetic resonance imaging

相位对比法(phase-contrast, PC)磁共振成像是利用血液流动产生的相位变化的原理获得图像,既能提供血管解剖结构信息,又能提供血流方向、速度及流量等血流动力学信息^[1-2]。常用的方法有二维相位对比法、三维相位对比法和电影相位对比法。二维相位对比序列成像时间较短,可屏气扫描,但部分容积效应较重^[3]。三维相位对比信噪比较高,空间分辨率较高,部分容积效应小,但扫描时间长^[4]。本研究中采用三

维定量流动测量(three dimensional quantitative flow measurement, 3D QFlow measurement)作为 3D 电影相位对比技术执行,是一种数据采集与心跳周期同步的成像技术,结合使用回顾性心电门控,可以将流动信息作为时间函数进行研究。国内外学者对颈动脉狭窄引起的慢性脑缺血进行了大量研究,但对颈动脉狭窄、脑组织血流量减少及慢性脑缺血损伤的结合研究较少。本研究尝试采用 3D QFlow 序列获得脑组织灌注信息,并与 DWI 相结合,探讨颈动脉狭窄、颈内动脉流动力学改变与脑白质损伤的关系,旨在进一步加深对颈动脉狭窄患者慢性脑缺血的认识水平。

作者单位: 116021 辽宁,大连市第五人民医院放射科(方慧、孟凡伟、周慧、曲涛),介入科(姜洪雁、周勇)

作者简介:方慧(1978-),女,辽宁新民人,硕士,副主任医师,主要从事神经影像诊断和研究工作。

基金资助:大连市科学技术局资助项目(2013E15SF151)

材料与方法

1. 一般资料

2013年6月—2014年10月本院经临床及影像学证实的颈动脉中度以上狭窄患者27例,男14例,女13例,年龄48~95岁,平均(68.93±10.32)岁。14例为单侧、13例为双侧颈动脉狭窄,其中颈动脉重度狭窄及闭塞14支,中度狭窄26支,因其中1支重度狭窄血管的QFlow图像上血管显示不清而被剔除,故重度狭窄及闭塞组研究对象为13支颈动脉。所有患者行颅脑常规MRI、MRA和DWI、颈动脉对比增强MRA、颈内动脉(internal carotid artery, ICA)MR 3D QFlow和CDFI检查。各项检查的时间间隔不超过两周,其间患者未出现急性脑血管病,新发脑梗死者两周内无明显进展。排除标准:①颈动脉存在明确的非动脉粥样硬化病变;②颅内动脉狭窄;③心源性因素致颅内缺血;④急性脑出血;⑤大面积脑梗死;⑥特定原因引起的脑白质脱髓鞘改变;⑦有严重精神症状或幽闭恐惧症等无法耐受检查者。

2. 仪器设备和检查方法

使用Philips Interia 1.5T超导MR扫描仪和8通道头颈联合线圈。扫描序列和参数如下。①DWI序列:TR 2940 ms, TE 83 ms,层厚7 mm,激励次数1,视野23.0 cm×23.0 cm×14.3 cm,矩阵192×153, EPI因子7, b值为0和1000 s/mm²;②颈动脉对比增强MRA:视野32 cm×32 cm×8 cm,矩阵508×508,激励次数1, TR 5.8 ms, TE 2.1 ms,扫描范围自主动脉弓至大脑前中动脉主干,经肘静脉注入钆喷酸葡胺,剂量0.02 mmol/kg,流率2.3~2.5 mL/s,继之以相同流率注射等量生理盐水;③3D QFlow序列:扫描平面位于颈动脉分叉以上1~2 cm水平垂直于颈内动脉, TR 18 ms, TE 5.9 ms,视野15.0 cm×10.3 cm×1.0 cm,矩阵128×73,激励次数1,翻转角15°; heart phases 15, Stacks 1,层数5,扫描时间5 min 15 s,流速编码(velocity encoding)100 cm/s,编码方向由足侧向头侧。使用回顾性心电门控,呼吸补偿及流动补偿技术。(2)CDFI采用Siemens Entares脉冲多普勒超声诊断仪,10~12 mHz线阵探头。被检者仰卧位肩下垫枕,头稍后仰且略偏向对侧,先右后左纵横两个切面,在颈动脉分叉上方1~2 cm处对ICA进行检查,测量收缩期峰值流速(peak systolic velocity, PSV)、舒张期峰值流速(end diastolic velocity, EDV)、流速-时间积分(velocity-time integrate, VTI)、管腔内径(diameter, D)及阻力指数(resistance index, RI)。

3. 图像的后处理、数据测量及计算

图像后处理:Extended MR Workspace 2.6.3.4。

ADC值测量:将感兴趣区(region of interest, ROI)置于侧脑室体前部旁的分水岭区(沿大脑中央沟走行方向,向侧脑室体部做延长线,距室管膜6 mm处)及侧脑室额角旁额叶脑白质, ROI形状及大小尽量保持一致,面积为(20±1) mm²。所有数据测量3次取平均值。颈动脉狭窄程度的分级:颈动脉狭窄程度按公式(1)计算:

$$\text{血管狭窄程度}\%=(1-\text{血管最窄处管腔直径}/\text{狭窄远端正常管腔直径})\times 100\% \quad (1)$$

依据北美症状性颈动脉内膜切除协作组(North American Symptomatic Carotid Earterectomy Trial, NASCET)的分级标准对狭窄分度进行分级:0%~29%为轻度狭窄,30%~69%为中度狭窄;70%~99%为重度狭窄;100%为完全闭塞。3D QFlow血流动力学分析方法:在扫描获得的幅度图(fast field echo-magnitude, FFE-M)图像上勾画ICA管腔内ROI,将ROI复制到相位图(phase contrast angiography phase, PCA-P)上,获得时间-信号强度曲线,根据后者确定心动周期舒张末期时间点,返回FFE-M图,选择中间3个层面,重新绘制ROI并复制到PCA-P图上,分别测量双侧ICA平均流速(mean velocity, MV)、峰值流速(maximum velocity value, MVV)、流量(Flux, F)和管腔面积(total pixel area, TPA)等血流动力学参数,取3个层面测量数据的平均值。CDFI测量的颈内动脉管腔截面积按照公式(2)进行计算:

$$S=\frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

D取颈内动脉长径和短径的平均值。

根据公式(3)计算脑血流量(blood flow, BF):

$$BF=\frac{VTI\times\pi D^2}{4} \quad (3)$$

4. 统计学分析

所有数据使用SPSS 19.0软件进行统计分析。对QFlow及CDFI测量的血流动力学参数行Pearson相关检验;QFlow技术测量的ICA的血流量、平均流速分别与血管狭窄程度行Spearman相关检验;QFlow技术测量的血流量、平均流速分别与不同脑区ADC值行Pearson相关检验。以 $P<0.05$ 差异为有统计学意义。

结果

MR 3D QFlow与CDFI测量的不同狭窄程度的颈内动脉血流动力学参数及相关性分析结果见表1、2。随颈动脉狭窄程度的加重,颈内动脉分叉上方1~2 cm处单位时间内血流量呈下降趋势。两种检查方法测量的各项血流动力学参数的相关性较好($P<0.01$)。

表1 MR PC-Qflow 和 CDFI 测量的不同狭窄程度 ICA 的血流动力学参数

检查方法	峰值流速(cm/s)			平均流速(cm/s)			管腔面积(mm ²)			流量(mL/min)		
	中度以下	中度	重度	中度以下	中度	重度	中度以下	中度	重度	中度以下	中度	重度
QFlow	18.20±4.35	17.17±3.90	20.58±11.36	6.72±0.83	6.39±1.07	7.30±2.94	51.55±2.70	49.35±4.31	42.56±15.95	207.06±20.63	188.13±28.71	161.08±33.56
CDFI	47.09±5.40	48.24±7.78	52.56±8.78	12.53±3.17	11.49±3.91	17.05±11.90	46.10±6.52	39.62±8.68	30.07±13.63	335.99±39.68	258.06±41.44	222.09±50.72

表2 2种测量的ICA血流动力学参数的相关性

参数	r 值	P 值
峰值流速(cm/s)	0.453	<0.01
平均流速(cm/s)	0.695	<0.01
管腔面积(mm ²)	0.573	<0.01
流量(mL/min)	0.795	<0.01

不同狭窄程度 ICA 的流量、平均流速及同侧各脑区 ADC 值的测量结果见表 3。随狭窄程度加重,颈内动脉流量呈下降趋势,平均流速先降后升,相应脑区的 ADC 值呈上升趋势(图 1)。ICA 流量与颈动脉狭窄程度呈低度负相关。重度颈动脉狭窄患者同侧大脑前循环血流量明显减低。轻中度颈动脉狭窄平均流速及峰值流速变化不明显,重度狭窄较中度狭窄流速有所下降。两种手段所测平均流速($r=0.695, P<0.01$)及流量($r=0.795, P<0.01$)中等程度相关,两种方法测量的管腔面积及峰值流速的相关性低。

MR QFlow 测量的颈内动脉流量、流速与同侧大脑半球感兴趣区 ADC 值之间的相关性检验结果见表 4。侧脑室前部旁白质及额叶脑白质的 ADC 值与颈内动脉流量呈中度负相关。

表4 测量ICA流速和流量与对应脑区ADC值的相关性

统计值	ADC 值	
	侧脑室前部旁白质	额叶皮质下脑白质
流量		
r 值	-0.624	-0.533
P 值	<0.01	<0.01
流速		
r 值	0.045	-0.059
P 值	>0.05	>0.05

讨论

1. QFlow 技术与 CDFI 测量参数的比较

本研究采用 Philips MR 3D QFlow 序列定量测量颈内动脉的血流情况。QFlow 序列是一种电影相位对比技术,图像数据连续采集,同时接受 ECG 信号,在图像重建时将所获连续数据内插到特定时相,使之相一致^[5]。图像采集后经计算机软件处理得到一个心动周期的模量图(phase contrast angiography-modulus,

PCA-M)、幅度图和相位图三组图像,各 15 帧。

CDFI 是临床上常用的血流动力学测量方法,具有实时、便捷、廉价等优点。但其尚难以提供精细和全面的血流动力学信息,不能满足临床上的要求。PC-MRI 流速测量的可重复性、一致性及图像的空间分辨率高,可在任何方向进行定量容积测量,能够对流场提供更为全面的信息,同时有助于减少主观判断的影响^[6]。除此之外,PC-MRI 的潜在优势在于为对比增强 MRA 能进一步对血管的结构信息等提供有益补充。不是所有的血管狭窄都会引起显著的血流动力学改变,PC-MRI 可用于识别引起显著血流动力学变化的血管狭窄,继而指导治疗计划的制订^[7]。但 PC-MRI 检查时间长,易出现门控错误,影响其临床应用价值。

本组研究结果显示 QFlow 与 CDFI 测量的 ICA 流量和平均流速呈中度正相关、峰值流速呈低度相关。Enzmann 等^[8]使用 Cine-PC 法与多普勒超声测量头颈部血管的血流参数,其结果与本研究基本一致,与郗农等^[5]和雷晓燕等^[9]使用 2D QFlow 序列和多普勒超声测量肺动脉流量和平均流速所获得的研究结果也基本一致。MRI 时间分辨率较低,每帧相位图得到的都是心动周期某一时段内实际流速的均值,不能实时测量血流流速,因而可能导致对峰值流速的低估^[10],并影响整个心动周期内测量的平均流速和流量。本研究中每个心动周期采集 15 帧电影图像,时间分辨率在 53ms 左右,但与多普勒超声的实时成像相比仍有差距,这也体现在本研究中 QFlow 测量的峰值流速与 CDFI 测量结果相关性较低。

正确选择流速编码对 MRI 定量流动测量的准确性至关重要。流速编码是指运动质子达到 180°相位位移时的速度,血流流速越快,相位变化越明显;流动方向与流速编码方向一致,速度越快,信号越亮,为正值;方向相反,速度越快,信号越暗,为负值^[5]。实际峰值流速超出设定值部分出现相位混淆,被误认为是反向血流。通常认为大的流速编码可以减少相位混淆的发生概率。但流速编码设置过高,显著超出血管内血

表3 不同狭窄程度 ICA 血流量、平均流速与同侧脑区 ADC 值 Spearman 相关检验

指标	狭窄程度			r 值	P 值
	中度以下	中度	重度		
侧脑室前部旁白质	835.66±75.92	911.08±152.56	1039.45±220.98	0.373	<0.01
额叶白质	769.50±77.47	816.48±75.34	921.72±199.40	0.372	<0.01
流量(mL/min)	207.06±20.63	188.12±28.71	161.08±33.56	-0.467	<0.01
平均流速(cm/s)	6.72±0.83	6.39±1.07	7.30±2.94	0.132	>0.05

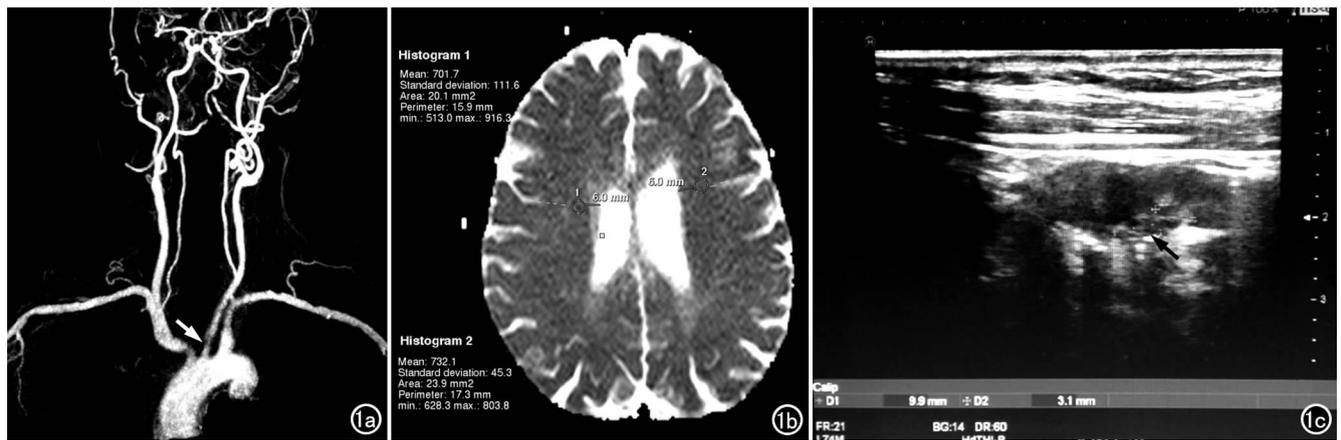


图1 左侧颈总动脉狭窄。a) 对比增强MRA示左侧颈总动脉管腔重度狭窄(箭); b) ADC图显示左侧分水岭区ADC值高于右侧; c) 多普勒超声显示左侧颈总动脉管腔狭窄(箭)。

流最大流速时,流动导致质子相位变化差异较小,测得的流速误差较大,对慢血流的检出能力会受到影响^[11]。有研究者认为理想的流速编码的设定应为感兴趣区实际最大流速的125%以内^[12]。也有学者认为大于实际流速的10%~80%,流体边缘可以清晰显示,流速测量值与实际流速更为接近,较大的流速编码并没有对测量结果产生明显影响^[13]。本研究中流速编码设定为100cm/s,与测量结果比较,流速编码设置偏高,有可能影响测量结果的准确性。

感兴趣区的选择和测量方法也很重要。①层面选择需尽量在与血管正交的平面内进行,否则,覆盖区域过大,包含邻近血管外区域是会导致测量误差。②国内有学者在进行血流定量研究时,选择直接在PCP-P图上沿血管轮廓内缘每间隔一定距离绘制ROI。笔者认为FFE-M是显示血管解剖结构最佳的图像,在FFE-M图上绘制ROI并复制到PCP-P图将有利于正确判断管腔范围。③目标血管的形状及位置随心动周期可有一定程度的变化。本研究选择在舒张末期不同层面上分别手绘血管内ROI,尽量避免过高或过低评价血流量。

另外回顾性心电门控不会出现伪门控,前瞻性门控需要一段时间使磁化矢量达到稳态、耗时长,因而本研究中选择使用回顾性心电门控。QFlow序列图像数据连续采集,在图像重建时将所获连续数据内插到特定时相,如果心率与实际出入较大或心率不稳者则可能影响测量数据的准确性。

本研究中样本数量少,有待于进一步扩大样本量进行研究。在下一步研究中,笔者考虑从以下几方面进行改进:①适当降低流速编码;②对患者心率进行药物干扰以保持心律齐整;③尝试减少容积厚度来缩短检查时间。

2. QFlow序列测量的血流参数与对应脑区ADC

值的相关性

重度ICA狭窄时,慢性脑缺血发生率升高^[16],脑白质纤维束受损^[17],狭窄侧相应脑区的ADC值明显增高^[18],去除颈动脉斑块后相关脑区的ADC值下降^[19]。有研究者认为ADC是联系慢性脑缺血与颈动脉狭窄的一种准确方法^[18]。根据Rentsch-Granges等^[18]对颈动脉狭窄患者低灌注脑白质损伤的研究结果,本研究中选择对前循环缺血较为敏感的、隶属于脑内分水岭区的侧脑室体前部旁的脑白质区作为感兴趣区。由于本研究中入组病例未对大脑后循环供血情况进行界定,为避免后循环供血差异影响对照组的结果,故选择同为大脑前循环供血的同侧额叶脑白质区作为对照。

本研究发现,侧脑室体旁前部脑白质的平均ADC值高于额叶脑白质(表2),且与同侧颈内动脉脑血流量呈负相关、与平均流速成正相关(表3)。与额叶脑白质ADC值相比,侧脑室体旁前部脑白质ADC值与颈内动脉血流量相关性更强。二者同样为大脑前循环供血,考虑原因可能有三:①健康成人半卵圆中心的ADC值高于额叶^[20];②本研究选取侧脑室额角旁的脑白质作为感兴趣区,前交通支可能对颈动脉狭窄侧额叶供血起代偿作用,而本研究中有3例4支狭窄血管对应的颅内血管有前交通支开放;③侧脑室旁前部脑白质属脑内分水岭区,更容易发生脑缺血。

本研究尚存在很多不足:选择的病例为颈动脉中度以上狭窄的患者作为疾病组,未涵盖全部样本群。选择额叶作为正常脑白质区与脑内分水岭区进行比较,而额叶脑白质可能受到颈内动脉供血减低的影响。本组研究中对等级资料狭窄程度与定量资料ADC值相关性检验采用Spearman相关检验。研究中考虑到轻度狭窄对颅内血流灌注的影响小^[21],将正常和轻度狭窄并为一组,这对于资料数据的规律性研究科可能

造成一定影响。另外,本组研究样本量有限,有待于进一步扩大样本进行研究。

综上所述,采用 MR 3D QFlow 序列评价颈内动脉血流动力学变化是可行的,颈内动脉血流量减低与同侧颈动脉狭窄、供血脑白质区 ADC 值升高具有一定的相关性,颅脑 DWI、颈内动脉 3D QFlow 序列等多种 MRI 手段相结合,可以为颈内动脉供血区慢性脑缺血研究提供更多、更加全面的信息。

参考文献:

- [1] Gatehouse PD, Keegan J, Crowe LA, et al. Applications of phase-contrast flow and velocity imaging in cardiovascular MRI[J]. *Eur Radiol*, 2005, 15(10): 2172-2184.
- [2] Johnson KM, Wieben O, Samsonov AA. Phase-contrast velocimetry with simultaneous fat/water separation[J]. *Magn Reson Med*, 2010, 63(6): 1564-1574.
- [3] Lotz J, Doker R, Noeske R, et al. In vitro validation of phase-contrast flow measurements at 3T in comparison to 1.5T: precision, accuracy, and signal-to-noise ratios[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2005, 21(5): 604-610.
- [4] Korosec F, Turski P. Velocity and volume flow rate measurements using phase contrast magnetic resonance imaging[J]. *Inter J Neuroradiol*, 1997, 3(4): 293-318.
- [5] 郗农, 雷晓燕, 陈敏, 等. MR 相位对比脉冲序列在胸部血管成像中的应用[J]. *西安交通大学学报(医学版)*, 2003, 24(4): 354-356.
- [6] Michael C, Jain LA, Magland JF, et al. Time-resolved absolute velocity quantification with projections[J]. *Magn Reson Med*, 2010, 64(6): 1599-1606.
- [7] Cosottini M, Pingitore A, Michelassi MC, et al. Redistribution of cerebropetal blood flow in patients with carotid artery stenosis measured non-invasively with fast cine phase contrast MR angiography[J]. *Eur Radiol*, 2005, 15(1): 34-40.
- [8] Enzmann DR, Marks MP, Pelc NJ, et al. Comparison of cerebral artery blood flow measurements with gated cine and ungated phase-contrast techniques[J]. *J Magn Reson Imaging*, 1993, 3(5): 705-712.
- [9] 雷晓燕, 沈亚梅, 郭佑民, 等. 肺动脉流速的 MRI 测量与多普勒超声比较研究[J]. *实用放射学杂志*, 2006, 22(1): 27-29.
- [10] 马晓海, 张兆琪, 李治安, 等. 相位对比磁共振技术测量冠状动脉血流的方法有效性研究[J]. *中国医学影像技术*, 2005, 21(4): 601-604.
- [11] 刘明, 李彩英, 周立霞, 等. 二维相位对比 MRI 在稳态流体模型的定量测量[J]. *放射学实践*, 2009, 24(3): 247-250.
- [12] Chai P, Mohiaddin R. How we perform cardiovascular magnetic resonance flow assessment using phase-contrast velocity mapping[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2005, 7(4): 705-716.
- [13] 王荣品, 刘辉, 梁长虹, 等. 3.0T MRI 相位对比法对流体模型的定量测量研究[J]. *放射学实践*, 2005, 20(5): 474-477.
- [14] 闫新成, 杨广夫, 韩博, 等. 椎动脉 MR 血流定量测定研究[J]. *实用放射学杂志*, 2008, 24(5): 691-693.
- [15] 阮志兵, 范光明, 焦俊, 等. 3.0T MR 相位对比法成像定量测定正常人下肢静脉血流的研究[J]. *中华放射学杂志*, 2014, 48(2): 119-123.
- [16] Li G, Xue YL, Min F. Recent progress on small vessel disease with cognitive impairment[J]. *Int J Clin Exp Med*, 2015, 8(5): 7701-7709.
- [17] Lin CJ, Tu PC, Chern CM, et al. Connectivity features for identifying cognitive impairment in presymptomatic carotid stenosis[J/OL]. *PLoS One*, 2014, 9: e85441. DOI: 10.1371/journal.pone.0085441. eCollection 2014.
- [18] Rentsch-Granges V, Assal F, Pereira VM, et al. ADC mapping of chronic cerebral hypoperfusion induced by carotid artery stenosis[J]. *J Neuroradiol*, 2011, 38(4): 232-237.
- [19] Helenius J, Soine L, Salonen O, et al. Leukoaraiosis, ischemic stroke, and normal white matter on diffusion-weighted MRI[J]. *Stroke*, 2002, 33(1): 45-50.
- [20] Brander A, Kataja A, Saastamoinen A, et al. Diffusion tensor imaging of the brain in a healthy adult population: normative values and measurement reproducibility at 3T and 1.5T[J]. *Acta Radiol*, 2010, 51(7): 800-807.
- [21] Rothwell PM, Warlow CP. Low risk of ischemic stroke in patients with reduced internal carotid artery lumen diameter distal to severe symptomatic carotid stenosis: cerebral protection due to low poststenotic flow? On behalf of the European Carotid Surgery Trialists' Collaborative Group[J]. *Stroke*, 2000, 31(3): 622-630.

(收稿日期: 2015-08-17 修回日期: 2016-01-11)