

论 著

PC-MRI技术对烟雾病的诊断价值及在血管重建术后复发中的应用*

唐晓娜¹ 杨士斌² 王欣¹
崔晓普¹ 孙素真^{1*}

1.河北省儿童医院(河北石家庄 050031)

2.河北医科大学第二医院儿科

(河北石家庄 050031)

【摘要】目的 探讨相位对比磁共振成像(PC-MRI)技术对烟雾病的诊断价值,并分析其在血管重建术后复发中的应用价值。**方法** 选取我院2011年1月至2021年1月80例烟雾病患者作为研究组,另选择同期健康体检者80例作为对照组。两组均行PC-MRI技术检查,比较两组血流动力学参数[颈内动脉、颈外动脉、颞浅动脉、椎动脉血流速度、血流量、血管管腔感兴趣区(ROI)面积]水平,评价各参数对烟雾病的诊断价值,研究组均接受血管重建术治疗,术后随访1年统计复发情况,对比复发与未复发患者颈内动脉、颈外动脉、颞浅动脉、椎动脉血流速度、血流量、血管管腔ROI面积,分析各参数与术后复发的关系。**结果** 研究组颈内动脉血流量小于对照组,颈外动脉、椎动脉血流量大于对照组,颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积小于对照组($P<0.05$);Spearman相关性分析,颈内动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积与烟雾病发生呈负相关($r=-0.476$ 、 -0.461 、 -0.503 、 -0.459),颈外动脉、椎动脉血流量与烟雾病发生呈正相关($r=0.422$ 、 0.477)($P<0.05$);ROC曲线分析,颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积诊断烟雾病的AUC分别为0.767、0.778、0.828、0.821、0.749、0.748,均 >0.7 ,且以上参数联合诊断的AUC为0.921(95%CI: 0.867~0.957),大于各参数单独诊断;复发患者脑血管造影Suzuki分期、血管狭窄程度高于未复发组,颈内动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积小于未复发组,颈外动脉、椎动脉血流量大于未复发组($P<0.05$);校正脑血管造影Suzuki分期、血管狭窄程度等其他因素前后,颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积对术后复发均有重要影响($P<0.05$)。**结论** PC-MRI技术可评估烟雾病患者血流动力学,其血流量、血流速度、血管管腔ROI面积等相关参数联合可提高烟雾病诊断效能,且可作为评估血管重建术后复发风险的依据。

【关键词】 相位对比磁共振成像; 烟雾病; 血流动力学; 血管管腔感兴趣区; 复发

【中图分类号】 R445.2

【文献标识码】 A

【基金项目】 河北省医学科学课题计划(20211738)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.11.007

Diagnostic Value of PC-MRI Technique for Smog and Its Application in Recurrence after Revascularization*

TANG Xiao-na¹, YANG Shi-bin², WANG Xin¹, CUI Xiao-pu¹, SUN Su-zhen^{1*}.

1.Hebei Children's Hospital, Shijiazhuang 050031, Hebei Province, China

2.Department of Pediatrics, The Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050031, Hebei Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the diagnostic value of phase-contrast magnetic resonance imaging (PC-MRI) technique for smog and to analyze its application value in recurrence after revascularization. **Methods** Eighty patients with smog disease in our hospital from January 2011 to January 2021 were selected as the study group, and another 80 patients with healthy physical examination in the same period were selected as the control group. Both groups were examined by PC-MRI technique, and the levels of hemodynamic parameters [internal carotid artery, external carotid artery, superficial temporal artery, vertebral artery blood flow velocity, blood flow, area of vascular lumen of interest (ROI)] were compared between the two groups to evaluate the diagnostic value of each parameter for smog disease. External carotid artery, superficial temporal artery, vertebral artery blood flow velocity, blood flow, vascular lumen ROI area, and analyze the relationship between each parameter and postoperative recurrence. **Results** The blood flow of the internal carotid artery in the study group was smaller than that of the control group, the blood flow of the external carotid artery and vertebral artery was larger than that of the control group, and the blood flow, flow velocity, and vascular lumen ROI area of the superficial temporal artery were smaller than those of the control group ($P<0.05$). Spearman correlation analysis showed that internal carotid artery blood flow, superficial temporal artery blood flow, blood flow velocity, and vascular lumen ROI area were negatively correlated with the occurrence of smog ($r=-0.476$, -0.461 , -0.503 , -0.459), and external carotid artery and vertebral artery blood flow were positively correlated with the occurrence of smog ($r=0.422$, 0.477) ($P<0.05$). ROC curve analysis, the AUCs for the diagnosis of smog in the internal carotid artery, external carotid artery, vertebral artery blood flow, superficial temporal artery blood flow, blood flow velocity, and vascular lumen ROI area were 0.767, 0.778, 0.828, 0.821, 0.749, and 0.748, respectively, all of which were >0.7 , and the AUC for the combined diagnosis of the above parameters was 0.921 (95% CI: 0.867-0.957), which was greater than each parameter alone; cerebral angiography Suzuki stage and stenosis degree were higher in recurrent patients than in the non-recurrent group, and internal carotid artery blood flow, superficial temporal artery blood flow, blood flow velocity, and vascular lumen ROI area were smaller than in the non-recurrent group, and external carotid artery and vertebral artery blood flow were greater than in the non-recurrent group ($P<0.05$); correction for cerebral angiography Suzuki stage, stenosis degree, and other factors before and after correction for other factors such as cerebral angiographic Suzuki staging and degree of stenosis, internal carotid artery, external carotid artery, vertebral artery blood flow, superficial temporal artery blood flow, blood flow velocity, and vascular lumen ROI area had significant effects on postoperative recurrence ($P<0.05$). **Conclusion** PC-MRI technique can evaluate the hemodynamics of patients with smog, and the combination of its relevant parameters such as blood flow, blood velocity, and vascular lumen ROI area can improve the diagnostic efficacy of smog, and it can be used as a basis for assessing the risk of recurrence after revascularization.

Keywords: Phase Contrast Magnetic Resonance Imaging; Smog; Hemodynamics; Vascular Lumen Area Of Interest; Recurrence

烟雾病为特发性、慢性脑血管疾病,主要表现为颈内动脉及其分支血管进行性狭窄、闭塞;起病隐匿,病情进展缓慢,首发症状通常为缺血、出血所致神经功能障碍^[1-2]。研究表明,早期进行血管重建术可减轻脑功能损伤、改善受累脑区供血,但具有一定复发风险^[3]。因烟雾病易被其他疾病症状遮掩,引发漏诊、误诊;因此烟雾病早期诊断、治疗后复发风险评估均对患者预后具有重要意义。数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)是烟雾病诊断的金标准,但其为有创操作且较为复杂,不宜重复应用,在烟雾病疗效监测、预后评估中具有局限性^[4]。相位对比磁共振成像(phase-contrast magnetic resonance imaging, PC-MRI)可无创、定量地测定心动周期内脑血流、脑脊液的流速、流量及其方向,已在主动脉疾病、心脏瓣膜病等心血管疾病中进行应用研究,其准确性、可重复性已被证实^[5-6]。本研究尝试探讨PC-MRI技术对烟雾病的诊断价值及在血管重建术后复发中的应用价值,旨在为临床诊断与评估复发风险提供可靠的影像学技术。现报告如下。

1 资料与方法

1.1 选例基线资料 选取我院2011年1月至2021年1月80例烟雾病患者作为研究组,另

【第一作者】唐晓娜,女,主治医师,主要研究方向:儿科脑血管病方向。E-mail: pough44383@21cn.com

【通讯作者】孙素真,女,主任医师。主要研究方向:小儿神经系统的疾病。E-mail: seshough657@21cn.com

选择同期健康体检者80例作为对照组。其中对照组男46例，女34例，年龄2~12岁，平均(7.32±2.16)岁；研究组男43例，女37例，年龄3~10岁，平均(6.89±1.40)岁。两组基线资料均衡可比(P>0.05)。本研究经我院伦理委员会审批通过。

纳入标准：符合《烟雾病和烟雾综合征诊断与治疗中国专家共识(2017)》诊断标准^[7]；单侧受累，DSA显示大脑中动脉起始段、颈内动脉终末端、大脑前动脉起始段狭窄或闭塞；存在偏瘫、抽搐发作等主要症状；DSA确诊闭塞动脉周围可见侧支血管、烟雾血管。存在头晕头痛、活动障碍等神经功能缺失症状；患者及近亲属均了解本研究并签订知情同意书。**排除标准：**颈内动脉狭窄率>50%；存在严重颅脑外伤；伴有心血管栓塞、神经纤维瘤病、脑膜炎；存在重要脏器病变、恶性肿瘤；存在血管炎、夹层等动脉粥样硬化病变；伴有免疫系统疾病；预计生存时间<3个月；精神异常。

对照组入选标准：心率60~100次/分，律齐；无心脑血管既往病史；无颅内病变、高血压、颈椎病及血液系统相关疾病。

1.2 方法

1.2.1 PC-MRI技术 行常规颅脑MRI扫描，之后先行矢状面T1磁化预备梯度回波序列扫描(MPRAGE)，扫描颅顶至颈窝，定位三维时间飞跃法MRA的扫描位置，颈总动脉分叉处稍下缘至胛胝体上缘，获得轴位图像，经后处理，以容积重建法、最大密度投影重建头颈部MRA图像，定位PC-MRI扫描位置，分别扫描术侧颈内动脉、颈外动脉、颞浅动脉及椎动脉。颞浅动脉扫描定位于颞部，其余各动脉扫描定位于颈总动脉分叉处稍上方，垂直于目标血管，扫描层面尽量垂直于颞浅动脉。所有目标血管均行预扫描评估目标血管可能的流速范围，选择目标血管最亮时的血液流速，再行正式扫描，细化流速编码，缩小流速编码范围及流速编码值间隔)，进行最终PC-MRI检查，自动得出各个动脉的血流速度、流量及血管管腔ROI面积。

1.2.2 血管重建术后随访 血管重建术后随访1年，1次/月，以复发、至截止时间及失访为结束点。复发判定：烟雾病相关症状改善后重新出现及加重，或出现新发相关症状、或发现脑内新发病变；排除水肿、肿瘤情况。

1.3 观察指标 (1)比较两组PC-MRI血流动力学参数，包括颈内动脉、颈外动脉、颞浅动脉及椎动脉的血流速度、血流量、血管管腔ROI面积。(2)分析PC-MRI血流动力学参数与烟雾病发生的关系。(3)分析PC-MRI血流动力学各项参数单独及联合对烟雾病的诊断价值。(4)比较复发与未复发患者临床资料、PC-MRI血流动力学参数，临床资料包括年龄、性别、首诊症状(缺血、出血)、发病位置、脑血管造影Suzuki分期及血管狭窄程度。(5)分析PC-MRI血流动力学参数对术后复发的影响。

1.4 统计学分析 采用SPSS 23.0对数据进行分析，计量资料以(x±s)表示，差异行t检验，计数资料以例(率)n(%)表示，差异行χ²检验，以Spearman相关性分析PC-MRI血流动力学参数与烟雾病发生的关系，采用受试者工作特征(ROC)曲线分析PC-MRI血流动力学参数对烟雾病的诊断价值，Logistic回归分析PC-MRI血流动力学参数对术后复发的影响，P<0.05为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 两组PC-MRI血流动力学参数 两组颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流速度、血管管腔ROI面积差异无统计学意义(P>0.05)；研究组颈内动脉血流量小于对照组，颈外动脉、椎动脉血流量大于对照组，颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积小于对照组(P<0.05)，见表1。

2.2 PC-MRI血流动力学参数与烟雾病发生的关系 Spearman相关性分析，颈内动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积与烟雾病发生呈负相关，颈外动脉、椎动脉血流量与烟雾病发生呈正相关(P<0.05)，见表2。

表1 两组PC-MRI血流动力学参数比较

血流动力学参数	研究组(n=80)	对照组(n=80)	t	P
颈内动脉				
血流速度(cm/s)	18.25±8.23	18.59±7.46	0.274	0.785
血流量(mL/s)	0.82±0.10	0.98±0.13	8.726	<0.001
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.16±0.04	0.17±0.05	1.397	1.644
颈外动脉				
血流速度(cm/s)	14.93±6.20	14.71±5.82	0.231	0.817
血流量(mL/s)	1.13±0.17	0.99±0.11	6.184	<0.001
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.15±0.04	0.14±0.04	1.581	0.116
颞浅动脉				
血流速度(cm/s)	8.61±1.03	9.97±1.16	7.841	<0.001
血流量(mL/s)	0.16±0.05	0.35±0.10	15.200	<0.001
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.07±0.02	0.12±0.03	12.404	<0.001
椎动脉				
血流速度(cm/s)	10.33±4.19	10.64±4.45	0.454	0.651
血流量(mL/s)	0.82±0.16	0.65±0.12	7.603	<0.001
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.12±0.03	0.13±0.04	1.789	0.076

表2 PC-MRI血流动力学参数与烟雾病发生的关系

指标	烟雾病	
	r	P
颈内动脉		
血流速度	0.102	>0.05
血流量	-0.476	<0.001
血管管腔ROI面积	0.113	>0.05
颈外动脉		
血流速度	0.204	>0.05
血流量	0.422	<0.001
血管管腔ROI面积	0.138	>0.05
颞浅动脉		
血流速度	-0.461	<0.001
血流量	-0.503	<0.001
血管管腔ROI面积	-0.459	<0.001
椎动脉		
血流速度	0.141	>0.05
血流量	0.477	<0.001
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.125	>0.05

2.3 PC-MRI血流动力学参数对烟雾病的诊断价值 ROC曲线分析, 颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积诊断烟雾病的AUC分别为0.767(95%CI: 0.694~0.830)、0.778(95%CI: 0.705~0.839)、0.828(95%CI: 0.760~0.883)、0.821(95%CI: 0.753~0.877)、0.749(95%CI: 0.674~0.814)、0.748(95%CI: 0.673~0.813), 见图1。

2.4 联合诊断价值 将颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积进行Logistic二元回归拟合, 返回预测概率Logit(P)作为独立检验变量, 获取联合诊断的AUC为0.921(95%CI: 0.867~0.957), 大于各参数单独诊断, 见图2。

2.5 复发与未复发患者临床资料、PC-MRI血流动力学参数 随访1年, 失访2例, 78例完成随访的患者复发15例, 未复发63例。复发与未复发患者年龄、性别、首诊症状、发病位置、颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流速度、血管管腔ROI面积差异无统计学意义($P>0.05$); 复发患者脑血管造影Suzuki分期、血管狭窄程度高于未复发组, 颈内动脉血流量小于未复发组, 颈外动脉、椎动脉血流量大于未复发组, 颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积小于未复发组($P<0.05$), 见表3。

2.6 PC-MRI血流动力学参数对术后复发的影响 Logistic回归分析, 在校正脑血管造影Suzuki分期、血管狭窄程度等其他因素前后, 颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积对术后复发均有重要影响($P<0.05$), 见表4。

表3 两组PC-MRI血流动力学参数比较

资料	复发患者(n=15)	未复发患者(n=63)	t/x ²	P
年龄(岁)	47.13±3.98	46.67±4.22	0.709	0.479
性别			0.053	0.818
男	10(66.67)	40(63.49)		
女	5(33.33)	23(36.51)		
首诊症状	0.011	0.918		
缺血	11(73.33)	48(76.19)		
出血	4(26.67)	15(23.81)		
发病位置	0.019	0.892		
左侧	9(60.00)	39(61.90)		
右侧	6(40.00)	24(38.10)		
脑血管造影Suzuki分期	9.827	0.043		
I期	0(0.00)	5(7.94)		
II期	0(0.00)	7(11.11)		
III期	7(46.67)	40(63.49)		
IV期	8(53.33)	11(17.46)		
血管狭窄程度	8.931	0.030		
轻度狭窄	2(13.33)	15(23.81)		
中度狭窄	2(13.33)	28(44.44)		
重度狭窄/闭塞	11(73.33)	20(31.75)		
颈内动脉				
血流速度(cm/s)	18.13±8.05	18.28±9.44	0.057	0.955
血流量(mL/s)	0.76±0.06	0.83±0.08	3.176	0.002
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.15±0.03	0.16±0.04	0.908	0.367
颈外动脉				
血流速度(cm/s)	14.96±5.58	14.92±5.19	0.026	0.979
血流量(mL/s)	1.26±0.15	1.10±0.13	4.159	<0.001
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.14±0.02	0.15±0.03	1.225	0.225
颞浅动脉				
血流速度(cm/s)	8.15±0.60	8.72±0.64	3.135	0.002
血流量(mL/s)	0.12±0.03	0.17±0.05	3.706	<0.001
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.05±0.01	0.08±0.02	5.624	<0.001
椎动脉				
血流速度(cm/s)	10.30±4.02	10.34±4.15	0.034	0.973
血流量(mL/s)	0.93±0.12	0.79±0.10	4.687	<0.001
血管管腔ROI面积(cm ²)	0.11±0.04	0.12±0.02	1.397	0.167

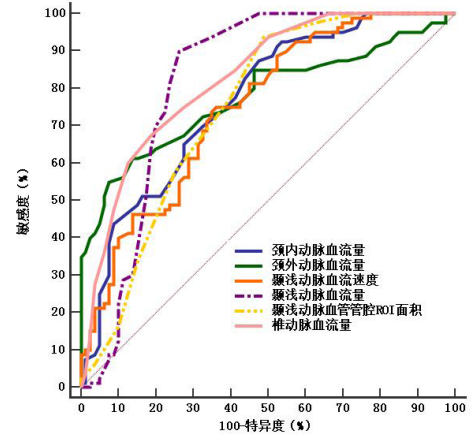


图1 PC-MRI血流动力学参数对烟雾病的诊断价值

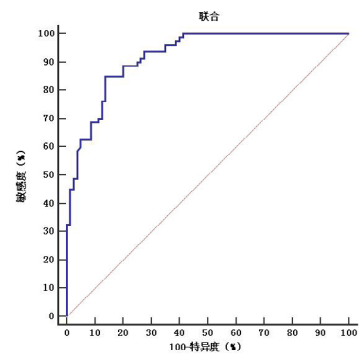


图2 联合诊断价值

表4 PC-MRI血流动力学参数对术后复发的影响

自变量	校正前			校正后		
	OR	95%CI	P	OR	95%CI	P
颈内动脉血流量	0.466	0.306~0.711	<0.001	0.312	0.187~0.520	<0.001
颈外动脉血流量	4.648	1.748~12.359	<0.001	3.743	1.522~9.205	<0.001
椎动脉血流量	3.248	1.202~8.774	<0.001	2.841	1.114~7.247	<0.001
颞浅动脉						
血流速度	0.426	0.221~0.823	<0.001	0.356	0.203~0.625	<0.001
血流量	0.445	0.268~0.740	<0.001	0.369	0.224~0.607	<0.001
血管管腔ROI面积	0.486	0.312~0.758	<0.001	0.401	0.230~0.698	<0.001

3 讨论

研究证实,动脉硬化、血管源性痴呆、高血压等疾病均可引起脑组织、血管的顺应性与颅内压改变,进而影响颅内血流的流动^[8]。PC-MRI作为测量颅内压的无创技术,在肺动脉主干血流动力学、肝脏肿瘤、脑脊液流体力学中的应用已有较多报道^[9-11],其诊断血流动力学变化的价值已有证实。本研究研究组颈内动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积小于对照组,颈外动脉、椎动脉血流量大于对照组($P<0.05$);可见PC-MRI可用于评估烟雾病患者血流动力学改变。血流量是PC-MRI技术的基本测量功能,流速测量后经后处理获取血流截面积、平均流速,进而得出确切血流量^[12]。满足时间分辨率时PC-MRI能识别心动周期中的血流速度异常波形,通过测定左心室输出量,评估心输出功能;由于血管为波动状态,不同时刻下血管管腔ROI面积有一定改变,PC-MRI需准确画出每一帧的血管边界,以获取准确ROI面积值^[13-14]。

经PC-MRI检测显示烟雾病患者颈内、颈外动脉血流量近似,均高于椎动脉、颞浅动脉,血流速度相比颈内动脉最快,颞浅动脉最慢,与临床实际相符^[15-16]。进一步分析相关性显示,颈内动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积与烟雾病发生呈负相关,颈外动脉、椎动脉血流量与烟雾病发生呈正相关($P<0.05$),说明血管重建术后可改善颞浅动脉、颈内动脉血流代偿,增加颅内供血。段宇等^[17]研究表明,脑血管重建术后烟雾病患者颞浅动脉及大脑中动脉供应区域血流量明显升高,本研究脑血管重建术后复发与未复发患者脑血管造影Suzuki分期、血管狭窄程度及PC-MRI血流动力学参数差异明显,与其研究结果具有相似性。本研究复发患者颈外动脉、椎动脉血流量大于未复发组($P<0.05$),脑血管重建术后大脑中动脉区域血流灌注增加,减少了椎动脉血流向循环代偿,术后复发患者病情进展,颈外动脉、椎动脉血流量再次升高^[18-19]。ROC曲线分析,颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积诊断烟雾病的AUC均 >0.7 ,且以上参数联合诊断的AUC为0.921,大于各参数单独诊断,表现出较高诊断价值。脑血管重建术可缓解烟雾病脑组织缺血缺氧状态,改善血流灌注及临床症状。本研究进一步分析烟雾病复发情况显示,校正脑血管造影Suzuki分期、血管狭窄程度等其他因素前后,颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积对术后复发均有重要影响($P<0.05$),提示PC-MRI技术可用于监测脑血管重建术后烟雾病患者恢复状况,及时干预复发风险患者,对减少复发、改善患者预后具有指导作用。

综上所述,PC-MRI技术可通过颈内动脉、颈外动脉、椎动脉血流量、颞浅动脉血流量、血流速度、血管管腔ROI面积等参数评估烟雾病患者血流动力学,对烟雾病的临床诊断、血管重建术后复发风险的评估具有实际指导意义。

参考文献

- [1] Hirano Y, Miyawaki S, Imai H, et al. Differences in clinical features among different onset patterns in moyamoya disease[J]. *J Clin Med*, 2021, 10 (13): 2815.
- [2] Fang YC, Wei LF, Hu CJ, et al. Pathological circulating factors in moyamoya disease[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22 (4): 1696.
- [3] 黄杨, 朱艳艳, 周福庆. 脑灰白质CT灌注成像参数对血管重建治疗烟雾病的评估价值[J]. *南昌大学学报(医学版)*, 2021, 61 (1): 34-38.
- [4] Sollmann N, Liebl H, Preibisch C, et al. Super-selective ASL and 4D ASL-based MR angiography in a patient with moyamoya disease: case report[J]. *Clin Neuroradiol*, 2021, 31 (2): 515-519.
- [5] 施美华, 孙爱敏, 王谦, 等. 先天性心脏病血流的不同相位对比MRI评估[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2020, 26 (3): 276-280.
- [6] Shah TR, Beig JR, Choh NA, et al. Phase contrast cardiac magnetic resonance imaging versus transoesophageal echocardiography for the evaluation of feasibility for transcatheter closure of atrial septal defects[J]. *Egypt Heart J*, 2022, 74 (1): 27.
- [7] 烟雾病和烟雾综合征诊断与治疗中国专家共识编写组, 国家卫生计生委卒中防治专家委员会缺血性卒中外科专业委员会. 烟雾病和烟雾综合征诊断与治疗中国专家共识(2017)[J]. *中华神经外科杂志*, 2017, 33 (6): 541-547.
- [8] 张艳丽, 吴雪梅, 樊海梅, 等. 重症脑血管病患者术后呼吸系统顺应性与颅内压的相关性研究[J]. *中国药物与临床*, 2022, 22 (6): 540-543.

- [9] 袁昌巍, 王盈进. 磁共振相位对比电影成像检测Chiari畸形 I 型脑脊液流体力学的研究进展[J]. *中国微创外科杂志*, 2020, 20 (2): 160-163.
- [10] Zhang L, Yin FF, Li T, et al. Multi-contrast four-dimensional magnetic resonance imaging(MC-4D-MRI): development and initial evaluation in liver tumor patients[J]. *Med Phys*, 2021, 48 (12): 7984-7997.
- [11] 马双春, 李昕, 车思雨, 等. 二维相位对比磁共振成像评估正常吸烟人群肺动脉主干血流动力学变化[J]. *第二军医大学学报*, 2020, 41 (11): 1289-1293.
- [12] 宋晓微, 赵红亮, 陈文文, 等. 四维血流磁共振成像技术在颅内动脉狭窄卒中患者血流动力学评估中的应用探索[J]. *中华神经科杂志*, 2022, 55 (1): 53-59.
- [13] 陈弘, 利颢天, 谢涵, 等. ROI面积对PC-MRI测量基底动脉血流动力学参数的影响[J]. *中国医学影像技术*, 2020, 36 (11): 1714-1717.
- [14] Komi S, Inoue Y, Hata H, et al. Clinical evaluation of left ventricular diastolic function using phase-contrast cine cardiovascular magnetic resonance imaging: a comparison with steady-state free precession cine cardiovascular magnetic resonance imaging and echocardiography[J]. *J Comput Assist Tomogr*, 2022, 46 (1): 56-63.
- [15] 郑余泽, 项华. 三种磁共振静脉成像技术PC-MRV、CE-MRV和TRICKS-MRA对脑皮质静脉成像的比较研究和临床应用初探[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2020, 26 (4): 334-338.
- [16] Ishii Y, Thamm T, Guo J, et al. Simultaneous phase-contrast MRI and PET for noninvasive quantification of cerebral blood flow and reactivity in healthy subjects and patients with cerebrovascular disease[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020, 51 (1): 183-194.
- [17] 段宇, 徐斌, 毛仁玲, 等. 相位对比磁共振成像定量评估烟雾病患者血管重建术前后血流动力学[J]. *国际脑血管病杂志*, 2020, 28 (3): 185-190.
- [18] 董芸, 吴建伟, 袁峰照, 等. 磁敏感加权成像在预测烟雾病患者血管重建术后复发的应用价值[J]. *北京医学*, 2021, 43 (7): 623-627.
- [19] 梁浩, 赵黎明, 高涛, 等. 联合脑血管重建术治疗成人烟雾病术后相关并发症的影响因素分析[J]. *中华神经外科杂志*, 2021, 37 (3): 245-249.

(收稿日期: 2023-03-29)

(校对编辑: 谢诗婷)