

研究论著

DOI: 10.3969/j.issn.0253-9802.2023.11.005

集合磁共振成像对急性缺血性脑卒中动脉闭塞后侧支动脉显示效果及图像质量的比较

李全喜 唐辉军 唐友杰 黄思健 李庆玲 张杰

【摘要】 目的 比较使用集合磁共振成像 (SyMRI) 技术与 MRI 传统序列对慢性大脑中动脉闭塞引起急性缺血性脑卒中的动脉闭塞的侧支动脉显示效果及图像质量, 分析两者的优劣性。方法 回顾性分析 67 例慢性大脑中动脉闭塞引起的急性缺血性脑卒中患者的 MRI 检查结果, 其中 MRI 常规序列包括 T₂ 加权像 (T₂WI)、T₁ 液体衰减反转恢复 (FLAIR)、T₂ FLAIR、时间飞跃法磁共振血管成像 (TOF-MRA), SyMRI 技术包括 MAGiC 序列, 采用配对 Kolmogorov-Smirnov 检验对比分析 TOF-MRA 和 MAGiC 相位敏感反转恢复 (PSIR) Vessel 对动脉闭塞后侧支动脉显示效果, 分析常规序列与 SyMRI 技术的信噪比 (SNR)。由 2 名放射科医师采用盲法主观分析图像质量, 采用 Kappa 检验分析结果的一致性。结果 MAGiC 序列 (成像时间 247 s) 比 MRI 常规序列 (成像时间 438 s) 的扫描时间缩短 51%。动脉闭塞后 MAGiC PSIR Vessel 比 TOF-MRA 显示的侧支更多 ($P < 0.001$)。MAGiC 序列比 MRI 常规序列的 SNR 更高 ($P < 0.001$)。SyMRI 图像质量总平均分 (8.85 分) 高于常规序列图像质量总平均分 (7.32 分), MAGiC PSIR Vessel 图像质量总平均分 (5.32 分) 高于 TOF-MRA 图像质量总平均分 (4.82 分), 比较差异均具有统计学意义 (P 均 < 0.05)。2 名放射科医师的评估结果具有很好的一致性。结论 在慢性大脑中动脉闭塞引起的急性缺血性脑卒中的 MRI 扫描中, SyMRI 扫描比 MRI 常规序列扫描耗时更短, SyMRI 图像质量优于 MRI 常规序列图像质量。在大脑中动脉闭塞后侧支的显示中, MAGiC PSIR Vessel 比 TOF-MRA 的优势更大。

【关键词】 脑卒中; 磁共振成像; 大脑中动脉; 集合磁共振成像; 侧支动脉

Assessment of display effect and image quality of synthetic magnetic resonance imaging for collateral branch artery after arterial occlusion in acute ischemic stroke Li Quanxi[△], Tang Huijun, Tang Youjie, Huang Sijian, Li Qingling, Zhang Jie.

[△] Department of Radiology, the Third Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510630, China

Corresponding author, Zhang Jie, E-mail: zhangj553@mail.sysu.edu.cn

【Abstract】 Objective To compare the display effect and image quality between synthetic magnetic resonance imaging (SyMRI) and conventional MRI sequences for the collateral branch artery after arterial occlusion in acute ischemic stroke caused by chronic middle cerebral artery occlusion, and analyze the superiority and inferiority of two imaging modalities. **Methods** MRI findings of 67 cases of acute ischemic stroke induced by chronic middle cerebral artery occlusion were retrospectively analyzed. Conventional MRI sequences included T₂-weighted image (T₂WI), T₁ fluid-attenuated inversion recovery (FLAIR), T₂ FLAIR, time-of-flight magnetic resonance angiography (TOF-MRA), SyMRI included MAGiC sequence. Paired Kolmogorov-Smirnov test was utilized to compare and analyze the display effect of TOF-MRA and MAGiC phase-sensitive inversion recovery (PSIR) Vessel on the lateral branch artery after arterial occlusion. The signal-to-noise ratio (SNR) between conventional MRI sequences and SyMRI was compared. Image quality was assessed by two independent radiologists using blinded method. The agreement of results was assessed by kappa coefficient. **Results** The scan time of MAGiC sequence (imaging time 247 s) was 51% shorter than that of conventional MRI sequences (imaging time 438 s). MAGiC PSIR Vessel showed more collateral branches after arterial occlusion than TOF MRA ($P < 0.001$). MAGiC sequences had a higher SNR than conventional MRI sequences ($P < 0.001$). The total average score of SyMRI image quality (8.85) was significantly higher than that of conventional MRI sequences (7.32), and the total average score of MAGiC PSIR Vessel image quality (5.32) was higher than that of TOF-MRA (4.82), and the differences were statistically significant (both $P < 0.05$). Bland-Altman analysis showed good agreement between two radiologists in results of. **Conclusions** In acute ischemic stroke caused by chronic middle cerebral artery occlusion, SyMRI scan is less time-consuming than conventional MRI sequence scan. The image quality

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目 (2023A1515010256)

作者单位: 510630 广州, 中山大学附属第三医院放射科 (李全喜, 唐辉军, 唐友杰, 黄思健, 张杰), 特诊中心 (李庆玲)

通信作者: 张杰, E-mail: zhangj553@mail.sysu.edu.cn

of SyMRI is better than that of conventional MRI sequence. MAGiC PSIR Vessel has a more significant advantage over TOF MRA in displaying collateral branches of middle cerebral artery occlusion.

【Key words】 Stroke; Magnetic resonance imaging; Middle cerebral artery; Synthetic magnetic resonance imaging; Collateral artery

慢性大脑中动脉闭塞 (CMCAO) 是急性缺血性脑卒中 (AIS) 的常见病因^[1-3]。在 CMCAO 的病程中, 大脑中动脉 (MCA) 形成粥样硬化斑块, 随着时间的发展血管狭窄再演变成血管闭塞, 神经元的转化与脑细胞功能均依赖脑血管通畅程度, CMCAO 侧支动脉的建立对预后积极作用^[4-6]。近年来 3.0T MRI 硬件与软件技术提升, 其具有无辐射、多参数、软组织分辨率高的特点, 在临床被推广应用。时间飞跃法磁共振血管成像 (TOF-MRA) 是目前最常用的磁共振血管成像 (MRA) 技术, 具有较高的准确度和特异性, 检查方式无创, 但图像分辨率有限, 细小动脉侧支的显示效果较差, 且 TOF-MRA 对血管走行迂曲诊断的假阳性率高、百叶窗伪影明显, 二级和三级血管评估效果也欠佳^[7-8]。

集合磁共振成像 (SyMRI) 技术是一种新型的 MRI 图像集合 (MAGiC) 序列, 能在 3~5 min 完成全脑成像, 通过后处理可获得多组常规图像如 T₁、T₂、T₂ 液体衰减反转恢复 (FLAIR) 序列、相位敏感翻转恢复成像 (PSIR) 序列及多组定量图像如 T₁ mapping、T₂ mapping、PD mapping 等, 目前已被应用于颅脑、乳腺、前列腺、膝关节等, 然而对评估颅内动脉闭塞后侧支动脉情况及其图像质量报道较少, MAGiC 相位敏感反转恢复 (PSIR) Vessel 保留了传统的脑组织高对比信息, 同时血管呈高亮信号, 可弥补 TOF-MRA 的不足^[9-10]。本研究旨在探讨在 CMCAO 引起的 AIS (AIS CMCAO) 患者中, SyMRI 技术图像与 MRI 传统序列图像对评估动脉闭塞后侧支的优劣性。

对象与方法

一、研究对象

参考文献^[6]中 AIS CMCAO 的侧支动脉及图像质量的评估方法, 基于双侧检验, 通过 PASS 15.0 软件计算样本量为 46 例。选取 2022 年 4 月至 2023 年 5 月在本院确诊为 AIS CMCAO 的 67 例患者, 其中男 48 例、女 19 例, 年龄 (68.5 ± 16.3) 岁, 按照扫描方案分为常规组与集合成像组。纳入标

准: ①临床诊断符合《脑血管病影像规范化应用中国指南》AIS, 无颅脑手术史^[1]。②同一患者扫描完成 MRI 常规序列 [T₂ 加权像 (T₂WI)、T₁ FLAIR、T₂ FLAIR、TOF-MRA] 以及 MAGiC、弥散加权成像 (DWI)。③临床诊断为 AIS CMCAO。排除标准: ①患幽闭恐惧症, 无法完成检查。②有开颅或植入颅内器械史或有微创手术史导致无法识别正常颅脑结构。③临床资料和图像资料不完整, MRI 检查伪影严重、无法评估。本研究经本院伦理委员会审查通过 (批件号: II2023-003-01), 所有入组人员签署知情同意书。

二、MRI 检查方法

采用 GE 3.0T MRI 扫描仪 (SIGNA Architect, GE Healthcare, Milwaukee, Wisconsin, USA) 和 48 通道头颅 AIR 线圈 (GE Healthcare)。其中 3D TOF-MRA (SPGR) 相位加速 (ARC) 相位, 层厚相位加速方向设为 2, 层间加速采用默认值, 压缩感知 (Hyper sense) 数值 1.5 倍。详细参数见表 1。

三、图像评价与分析

将 67 例患者图像中个人信息隐藏 (名字、性别、年龄等), 把图像传至 AW4.7 工作站。常规序列 T₂ WI、T₁ FLAIR、T₂ FLAIR、TOF-MRA 与 MAGiC 序列由 GE 主机软件 (MAGiC software version 100.1.1) 后处理自动生产 MAGiC T₂、MAGiC T₁ FLAIR、MAGiC T₂ FLAIR、MAGiC PSIR Vessel 后处理图像。由 2 名工作 8 年以上的放射科医师独立对区域性软脑膜侧支 (rLMC) 进行评价^[11]。TOF-MRA 与 MAGiC PSIR Vessel 序列总分为 20 分, 用于分析侧支动脉循环情况, 患侧软脑膜动脉和豆纹动脉供血 9 个区域: 基底节区、M1~M6 (大脑中动脉、大脑前动脉、大脑前动脉供血的 6 个区域)、大脑前动脉供血区域、大脑外侧裂区域。其中大脑侧裂区软脑膜侧支动脉血管显示计 0、2、4 分, 0 分为显影、2 分为显影少于对侧, 4 分为显影大于对侧; 其余 8 个区域计 0、1、2 分, 0 分为未显影, 1 分为显影少于对侧, 2 分为显影大于对侧。按得分将侧支动脉循环分为不良 (rLMC ≤ 10 分)、良好 (rLMC > 10 分)。

表1 常规扫描序列、MAGiC、TOF-MRA 扫描参数表

项 目	T ₂ WI	T ₁ FLAIR	T ₂ FLAIR	MAGiC	3D TOF-MRA	DWI
TR/ms	5 514	1 750	8 500	4 000	18	4 292
TE/ms	103	11.5	89.3	13.9&90.2	3.4	80
TI/ms	—	720	2 400	28	—	—
FOV/mm	240 × 240	240 × 180	240 × 240	240 × 240	220 × 180	240 × 240
Slice thickness/mm	5	5	5	3.5	1.2	5
Interslice gap/mm	1	1	1	0.7	-0.9	1
Acquisition matrix	352 × 352	320 × 256	260 × 260	256 × 256	320 × 256	164 × 160
ETL	30	9	22	16	—	—
NEX	1	2	2	1	0.84	1
Bandwidth/kHz	83.3	50	41.67	50	41.67	250
Flip angle	—	—	—	—	20	—
Acquisition time/s	44	95	137	247	162	64

注：—为未测。

分)^[12]。

在常规图像(T₂WI、T₁FLAIR、T₂FLAIR)与SyMRI图像(MAGiC T₂、MAGiC T₁FLAIR、MAGiC T₂FLAIR)勾画12个感兴趣区(ROI),包括双侧半卵圆中心、胼胝体膝部、胼胝体压部,取白质信号的平均信号强度值(SI)表示为脑白质的信号强度(SI_{组织})。在双侧枕叶皮层、额叶皮层、尾状核头勾画ROI脑灰质的信号强度(SI_{组织}),以上对应原始图测定上、下、左、右4个角,在4个角勾画相同ROI,取背景噪声的信号强度标准差(SD)表示为背景噪声强度(SD_{背景});AIS的病灶区域由2名医师参照DWI高信号、表观扩散系数(ADC)减低区域、T₂FLAIR,分别测量对应的常规序列与MAGiC序列,用AW4.7自带软件(Volume Viewer™ Version: 15.0)配准勾画病灶相同的ROI,勾画ROI面积为100 mm²,获取病灶区域信号强度(SI_{组织}),若病灶多个则测量最大病灶区域,分别记录结果。图像质量评分采用5分评估,1分为图像质量差,不能诊断;2分为图像质量模糊,影响诊断;3分为图像质量较好,不影响诊断,解剖细节欠清晰;4分为图像质量良好,部分解剖结构稍显示不清;5分为图像质量优,解剖结构显示非常清晰^[13]。常规序列图像(A)与MAGiC序列图像(B)信噪比(SNR) = SI_{组织}/SD_{背景},依次计算AIS正常脑白质、灰质、病灶区域的SNR。

四、统计学处理

采用SPSS 24.0处理数据,2组图像的SNR和2名医师的盲测数值、侧支动脉循环rLMC评分资料经Kolmogorov-Smirnov检验正态性,符合正态分

布的计量数据采用 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用配对 t 检验;非正态分布计量数据采用 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,组间比较采用Wilcoxon秩和检验。2名医师双盲法主观分析图像质量的一致性采用Kappa检验,Kappa值越高一致性越好。2位医师图像质量的评分、侧支动脉循环rLMC评分、SNR的一致性采用Bland-Altman分析。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、扫描时间

常规序列T₂WI、T₁FLAIR、T₂FLAIR和TOF-MRA扫描时间总计为438 s, MAGiC序列扫描时间为247 s,见表1。与常规序列比较, MAGiC序列扫描时间缩短51%。

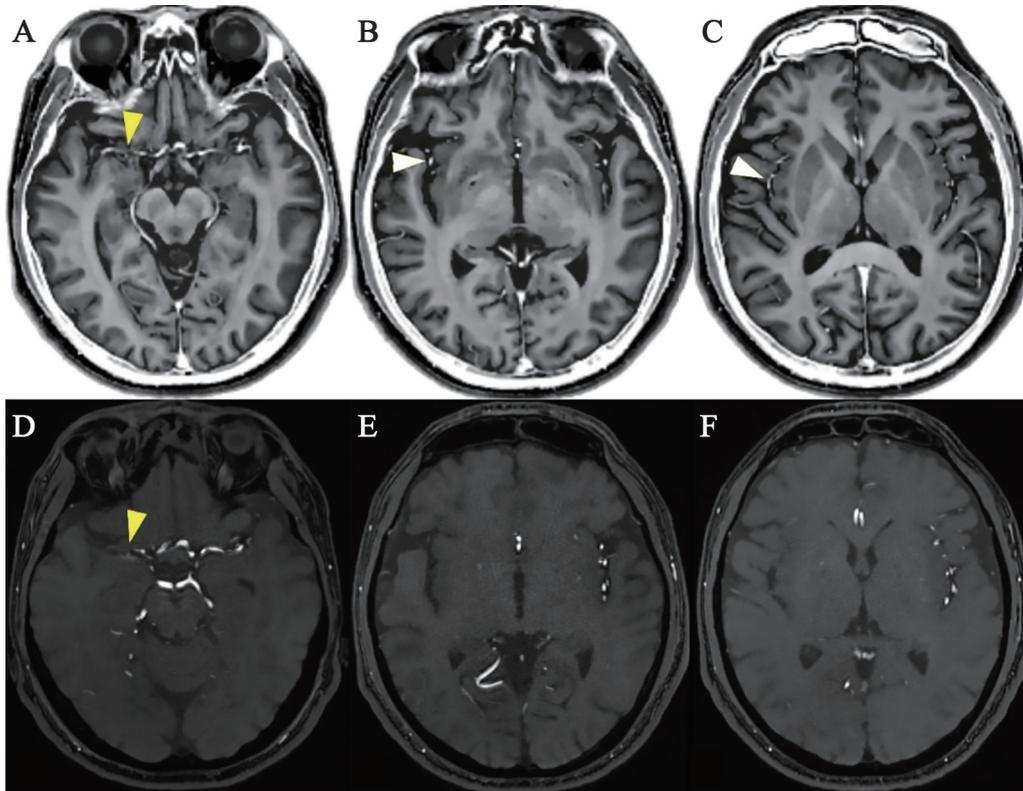
二、常规序列与MAGiC序列对侧支动脉的显示效果及SNR比较

与TOF-MRA比较, MAGiC PSIR Vessel对动脉梗阻后侧支动脉的显示更清晰, rLMC评分良好,整体图像的SNR较高,为17.056(3.443, 18.367)。常规图像的SNR中位数为14.431(2.632, 15.141)。比较差异均具有统计学意义($P < 0.001$)。见表2、图1。

对2名医师间的测量值进行一致性分析。在脑白质上,两者T₁值的95%限制一致性范围为-0.89~0.85。在脑灰质上,两者T₁值的95%限制一致性范围为-0.79~0.79。Bland-Altman分析显示2名医师在测量数值方面具有很好的一致性。见图2。

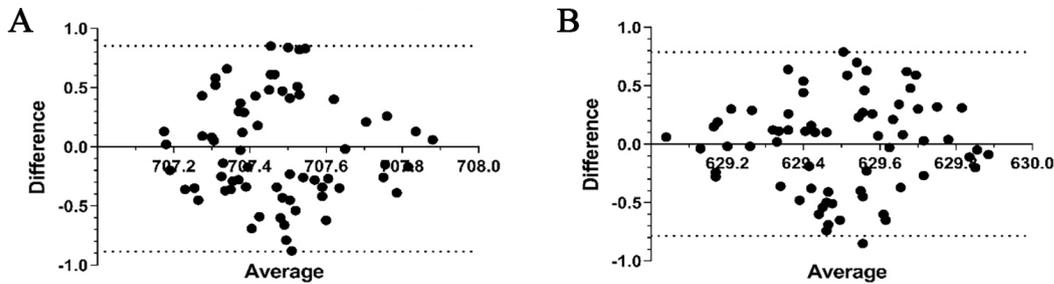
表 2 常规序列图像 (A) 与 MAGiC 序列图像 (B) 对侧支动脉的显示效果及 SNR 比较

序 列	大脑外侧裂 SI	基底节区 SI	M1~6 SI	大脑前动脉 SI	rLMC 评分	SNR
A	2.632 ± 0.98	15.141 ± 0.66	8.644 ± 0.73	13.213 ± 0.61	9.513 ± 0.47	14.431 (2.632, 15.141)
B	3.443 ± 0.68	18.367 ± 0.84	10.968 ± 0.81	16.387 ± 7.31	14.679 ± 0.78	17.056 (3.443, 18.367)
t/Z 值	12.313	9.434	7.622	4.268	8.314	3.673
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001



注: 患者男, 75 岁, MAGiC PSIR Vessel (A~C) 能显示动脉闭塞位置 (黄箭头所指) 和闭塞远方侧支 (白箭头所指); TOF-MRA (D~F) 显示右侧大脑中动脉闭塞位置 (黄箭头所指), 但闭塞远端的侧支显示不清楚。

图 1 常规序列与 MAGiC 序列对 AIS CMCAO 患者侧支动脉的显示效果比较



注: 67 例患者的常规 T₁ 序列与 MAGiC T₁ 序列 SNR 比较, 脑白质 (A) 和脑灰质 (B) 一致性分析 Bland-Altman 图。

图 2 一致性分析 Bland-Altman 图

三、常规序列图像与 SyMRI 技术图像质量定性分析

相同分辨率、观察视野下,常规序列图像与 SyMRI 技术图像的 AIS 病灶显示效果无明显差异。2 名医师对图像质量评分的一致性较好,可信度高 (Kappa 常规序列 = 0.714, Kappa SyMRI =

0.625, Kappa MAGiC PSIR Vessel = 0.653)。67 例患者的 SyMRI 技术图像质量评分高于常规序列图像, MAGiC PSIR Vessel 图像质量评分高于 TOF-MRA, 见表 3。采用 Bland-Altman 分析 2 名医师图像质量评分, 经配对 *t* 检验比较差异均有统计学意义 ($P < 0.05$), 见图 2。

表 3 2 位医师图像质量评分及一致性检验结果 ($\bar{x} \pm s$)

单位: 分

项目	医师 1	医师 2	平均分	Kappa 值	P 值
常规序列	7.23 ± 0.48	7.41 ± 0.62	7.32 ± 0.55	0.714	0.036
SyMRI	9.14 ± 0.37	8.56 ± 0.86	8.85 ± 0.62	0.625	0.012
TOF-MRA	4.51 ± 0.43	5.12 ± 0.72	4.82 ± 0.58	0.745	0.028
MAGiC PSIR Vessel	5.43 ± 0.43	5.21 ± 0.46	5.32 ± 0.46	0.653	0.035

讨 论

MAGiC 序列基于多个延迟多回波及 120° 交叉饱和脉冲, 采用 2 个回波时间和 4 个延迟时间, 快速自旋回波读出序列, 软件处理生成 T₁WI、T₂WI、FLAIR、PSIR 及 5 组定量图^[9,13]。本研究中 MAGiC 序列扫描时间较常规序列缩短 51%。Af Burén 等^[14]的研究表明, 在 AIS 急性期, 扫描方案、快速检查非常重要, SyMRI 技术能缩短扫描时间、提高卒中病灶的检出率, 其快速一次性成像能消除因检查时间长、患者配合差、图像伪影干扰等问题, 对于 AIS 的急诊诊疗有重要的实用价值。目前, SyMRI 技术的 MAGiC 序列已被应用于脑肿瘤、多发性硬化、成人脑白质老化及早产儿脑成熟等颅脑影像学研究中^[9,10,15-17]。

本研究中 MAGiC PSIR Vessel 显示大脑中动脉闭塞后侧支的能力优于 TOF-MRA。当新生的侧支血流速度慢时, TOF-MRA 不利于容积边缘血管的显示^[14]。同时 TOF-MRA 采集原始数据扫描范围小, 只提供血管充盈图像, 仅以顺行的方式显示血流信号, 血管闭塞时血流信号远端显示能力弱, 远端侧支评估不佳^[7,8,18]。MAGiC PSIR Vessel 用于常规图像的诊断同时, 还能显示血管反转充盈侧支动脉, 血液的流空效应使闭塞远端侧支显示信号强度更佳, 有助于显示细小侧支^[10,13]。卒中后颅脑的血流动力学会发生改变, 通过判断闭塞远端有无侧支来评估脑部供血改善情况, 有助于制定血脑屏障修复方案^[23,6]。亦有文献报道, 侧支循环 rLMC 评分良好与否可反映 CMCAO 大脑后动脉软脑膜血管供应的缺血区域, 本研究结果与报道一致^[12]。

不同医师通过 SyMRI 技术测量脑白质、脑灰质 T₁ 值具有很好的一致性, 这与 MAGiC 序列原理有关, MAGiC 序列基于快速自旋回波双回波采集所有的回波信号, 由长、短回波时间组成多回波序列, 其他组织对成像组织干扰较少, 重建噪声为 0, 具有较高的 SNR^[9,13]。在 AIS 病灶的显示方面, 本研究中 2 名医师对 SyMRI 图像质量的评分高于常规图像, 良好的图像质量是测量值具有较好一致性的保证。亦有研究报道常规序列图像与 SyMRI 技术图像相比, MAGiC T₁WI 在中枢神经系统多发性硬化中的病灶计数多于常规序列^[17]。故 MAGiC 序列在 AIS 图像的 SNR、图像质量上均优于常规序列, 能提供客观的诊断依据。

本研究具有一些局限性: ①本研究为单中心回顾性研究, 样本量少, 未加入 AIS 评分量表, 未纳入 AIS 多期病程的图像情况; ②未纳入 MRI 其他序列对 AIS 动脉闭塞后侧支情况和图像质量进行对比研究; ③未分析动脉狭窄程度与侧支显示的相关性; ④本研究结果由 GE 3.0T MRI 扫描仪 (SIGNA Architect) 获得, 其他机型未验证。

综上所述, 在 AIS CMCAO 患者的 MRI 检查中, SyMRI 技术比常规序列的扫描耗时更短, 图像质量更优, MAGiC PSIR Vessel 在大脑中动脉闭塞后侧支的显示上具有更大优势, 可为实现 AIS 快速成像和高效精确诊断提供新方法。

参 考 文 献

- [1] 国家卫生健康委员会脑卒中防治工程委员会神经影像专业委员会, 中华医学会放射学分会神经学组. 脑血管病影像规

- 范化应用中国指南. 中华放射学杂志, 2019, 53 (11): 916-940.
- [2] 龚家俊, 王文敏. 急性脑卒中后脑心综合征的临床特点及其对患者预后的影响. 新医学, 2021, 52 (5): 371-375.
- [3] 宋登花, 邓增山, 杨晓娟. 急性脑梗死患者动脉僵硬度相关参数变化与神经功能改善的关系. 新医学, 2023, 54 (7): 501-505.
- [4] Sato Y, Falcone-Juengert J, Tominaga T, et al. Remodeling of the neurovascular unit following cerebral ischemia and hemorrhage. *Cells*, 2022, 11 (18): 2823.
- [5] Powers W J, Rabinstein A A, Ackerson T, et al. 2018 guidelines for the early management of patients with acute ischemic stroke: a guideline for healthcare professionals from the American heart association/american stroke association. *Stroke*, 2018, 49 (3): e46-e110.
- [6] 王立志, 朱晔宁, 邓宇平, 等. 单中心急性前循环大血管闭塞性醒后脑卒中血管内治疗有效性与安全性研究. 新医学, 2021, 52 (7): 494-499.
- [7] 武春雪, 董孟琪, 单艺, 等. 动脉自旋标记联合时间飞跃法磁共振血管造影对脑动静脉分流的诊断价值. 中华医学杂志, 2021, 101 (23): 1791-1797.
- [8] 时传迎, 陈军, 张传臣, 等. TOF-MRA、3D-ASL联合区域选择 ASL 对烟雾病血管重建术后的血流评估. 磁共振成像, 2020, 11 (9): 735-740.
- [9] Luo X W, Li Q X, Shen L S, et al. Quantitative association of cerebral blood flow, relaxation times and proton density in young and middle-aged primary insomnia patients: A prospective study using three-dimensional arterial spin labeling and synthetic magnetic resonance imaging. *Front Neurosci*, 2023, 17 : 1099911.
- [10] Tanenbaum L N, Tsiouris A J, Johnson A N, et al. Synthetic MRI for clinical neuroimaging: results of the magnetic resonance image compilation (MAGiC) prospective, multicenter, multireader trial. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017, 38 (6): 1103-1110.
- [11] Menon B K, Smith E E, Modi J, et al. Regional leptomeningeal score on CT angiography predicts clinical and imaging outcomes in patients with acute anterior circulation occlusions. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011, 32 (9): 1640-1645.
- [12] 许开喜, 陈新建, 顾宝东, 等. 改良 SWAN-rLMC 评分对慢性大脑中动脉闭塞的不对称静脉血管征的评估和预后的影响. 国际医药卫生导报, 2022, 28 (24): 3426-3431.
- [13] 刘辉明, 尹国平, 别非, 等. 对比集合序列与常规序列头部 MR 图像质量. 中国医学影像技术, 2019, 35 (2): 268-271.
- [14] Af Burén S, Kits A, Lönn L, et al. A 78 seconds complete brain MRI examination in ischemic stroke: a prospective cohort study. *J Magn Reson Imag*, 2022, 56 (3): 884-892.
- [15] Duchaussoy T, Budzik J F, Norberciak L, et al. Synthetic T2 mapping is correlated with time from stroke onset: a future tool in wake-up stroke management? *Eur Radiol*, 2019, 29 (12): 7019-7026.
- [16] Granberg T, Uppman M, Hashim F, et al. Clinical feasibility of synthetic MRI in multiple sclerosis: a diagnostic and volumetric validation study. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2016, 37 (6): 1023-1029.
- [17] Bhuvu A N, Treibel T A, Fontana M, et al. T₁ mapping: non-invasive evaluation of myocardial tissue composition by cardiovascular magnetic resonance. *Expert Rev Cardiovasc Ther*, 2014, 12 (12): 1455-1464.
- [18] Boujan T, Neuberger U, Pfaff J, et al. Value of contrast-enhanced MRA versus time-of-flight MRA in acute ischemic stroke MRI. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2018, 39 (9): 1710-1716.

(收稿日期: 2023-06-26)

(本文编辑: 洪悦民)