

慢性颈内动脉闭塞患者血管斑块和脑血流动力学评估的 MRI 研究新进展

梁冬玲, 冯汝静, 邓德茂

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:82060315); 广西卫生健康委科研课题(编号:Z20200020); 广西重点研发计划项目(编号:桂科 AB22080053)

作者单位: 530001 南宁,广西中医药大学研究生院(梁冬玲); 530021 南宁,广西壮族自治区人民医院(广西医学科学院)放射科(冯汝静,邓德茂)

作者简介: 梁冬玲,在读硕士研究生,主管技师,研究方向:磁共振成像。E-mail:513543510@qq.com

通信作者: 邓德茂,医学博士,主任医师,研究方向:脑功能磁共振成像。E-mail:demaodeng@163.com



邓德茂,广西壮族自治区人民医院放射科主任,主任医师,医学影像学博士,博士后,博士研究生导师。研究方向:磁共振脑功能研究。中华医学会放射学分会神经学组委员,中国医师协会放射学分会神经学组委员,广西中西医结合学会医学影像专业委员会主任委员,广西医学会放射学分会副主任委员,《European Radiology》、《中华放射学杂志》等杂志审稿专家,《中国中西医结合影像学杂志》编委。参编大学本科医学影像学教材3部,主持国家自然科学基金项目2项,广西重点研发及省自然科学基金项目4项,发表论文60余篇,以第一作者或通信作者发表SCI论文30余篇。

[摘要] 慢性颈内动脉闭塞(CICAO)是缺血性卒中的常见原因之一。随着磁共振成像(MRI)设备的不断更新及技术发展,可用的MRI序列越来越多,特别是对CICAO患者的血管斑块及脑血流动力学的评估,有更多MRI新序列可选择。但这些评估序列成像时间较长,且在具体临床应用中各有特点,扫描规范尚未形成;血管斑块及脑血流动力学的定量评估体系仍在完善。文章对近年来评估CICAO的MRI研究作一综述,以期对血管斑块和脑血流动力学评估进行归纳,为CICAO的临床诊疗提供更好的参考。

[关键词] 慢性颈内动脉闭塞; 高分辨血管壁磁共振成像; 脑血流动力学

[中图分类号] R 445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1674-3806(2023)04-0342-06

doi:10.3969/j.issn.1674-3806.2023.04.07

Recent advances in MRI studies on evaluation of vascular plaques and cerebral hemodynamics in patients with chronic internal carotid artery occlusion LIANG Dong-ling, FENG Ru-jing, DENG De-mao. Graduate School, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530001, China

[Abstract] Chronic internal carotid artery occlusion(CICAO) is one of the common causes of ischemic stroke. With the continuous update of magnetic resonance imaging(MRI) equipments and the development of technology, more and more MRI sequences are available, especially for the evaluation of vascular plaques and cerebral hemodynamics in patients with CICAO, more new MRI sequences are selectable. However, the imaging time of these evaluation sequences is relatively long, and they have their own characteristics in specific clinical applications. Scanning specifications have not yet been developed. Additionally, the quantitative evaluation system of vascular plaques and cerebral hemodynamics remains to be improved. This paper reviews the MRI studies on the evaluation of CICAO in recent years, aiming to summarize the evaluation of vascular plaques and cerebral hemodynamics and provide better reference for clinical diagnosis and treatment of CICAO.

[Key words] Chronic internal carotid artery occlusion(CICAO); High-resolution vessel wall magnetic resonance imaging; Cerebral hemodynamics

慢性颈内动脉闭塞(chronic internal carotid artery occlusion, CICA0)是指颈内动脉闭塞时间 >4 周的一种血管疾病^[1],是缺血性卒中的常见原因之一^[2]。研究报道即使接受最佳药物治疗和危险因素得到良好控制,1 年中 CICA0 导致中风的风险仍接近 7%^[3]。血管内再通术是一种有效治疗 CICA0 的介入手术,术前血管斑块及脑血流动力学评估与手术指征、手术成功率及术后并发症密切相关。MRI 是目前用于颈内动脉血管斑块和脑血流动力学评估的最佳手段,但磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)序列众多且发展迅速,有必要对近年来的研究进展进行综述。

1 CICA0 患者的血管(斑块及血栓、闭塞残端类型、闭塞范围)评估

血管斑块是 CICA0 最主要的初期病理形式,即使斑块达不到血管闭塞或脑灌注障碍程度,但斑块的易损性足以造成急性缺血的严重后果,故血管斑块的易损性评估非常重要。易损性斑块特征有:斑块内出血(intraplaque hemorrhage, IPH)、富含脂质坏死核心(lipid-rich necrotic core, LRNC)、纤维帽(fiber cap, FC)薄或破裂、斑块表面钙化结节及溃疡、斑块炎症等^[4]。血管再通术是治疗 CICA0 的主要方法,可使缺血性脑卒中的发生概率降低 80%^[5]。介入导丝穿过闭塞处并进入真腔及放置保护装置,是手术成功的关键^[6]。而闭塞残端类型及其血栓的新旧则是影响导丝通过的关键因素。Hasan 等^[7]研究表明,斑块的位置可能与残端类型有关,而近端有残腔的 A 型和 B 型比无残腔的 C 型和 D 型更适合于再通术,且导丝更容易穿过真腔;闭塞节段长度 <5 cm 者,再通术成功率为 100%,较长者,成功率降为 50%,延伸至颅内者,再通效果不佳;近端或远端栓塞保护装置可以避免术中栓子脱落,但要求远端血管直径 >3 mm^[8],故有效评价闭塞远端血管管径亦是保障血管再通术成功的必要方法。目前用于评估 CICA0 患者上述血管情况的 MRI 序列主要有以下几种:

1.1 磁共振血管成像(magnetic resonance angiography, MRA)序列 MRA 常用的方法有 3 种:(1)相位对比法 MRA(phase contrast MRA, PC-MRA)因无法确定流速编码而不适用于 CICA0 患者;(2)对比增强法 MRA(contrast enhancement MRA, CE-MRA)成像速度快,但其与注射法灌注成像或 T1WI-CE 有冲突,使用受限;(3)时间飞越法 MRA(time-of-flight MRA, TOF-MRA)利用流入性增强效应成像,能显示斑块的轮廓及闭塞处的形态,用于观察与测量狭窄程度、狭窄长度、管腔直径等,较好显示血管树,可对闭塞

形态进行分型,缺点是有可能高估闭塞程度^[9],也不能显示斑块的内部结构。与 PC-MRA 和 CE-MRA 相比,TOF-MRA 更适用于 CICA0 患者。

1.2 可变翻转角快速自旋回波(sampling perfection with application optimized contrast using different flip angle evolutions, SPACE)序列 SPACE 序列的特点是利用流空效应达到黑血效果,信噪比稳定,可获得软组织对比度高的 T1WI、T2WI、质子密度加权像(proton density-weighted imaging, PDWI)图像,利于斑块成像分析。离体标本成像研究显示,3T 高分辨率多对比 MRI 可以识别斑块信号强度,LRNC 与 FC 的对比度在 T2WI 最强,在 PDWI 序列上次之,而在 T1WI 上对比度较差,钙化信号强度在 T2WI、PDWI 和 T1WI 图像上最低^[10],离体标本经脱水和蛋白质降解后由于成分与活体内斑块不同,对临床应用具有一定的参考意义。有文献表明, T1-SPACE 能够更好区分坏死组织、出血、纤维组织等成分信号^[11]。然而,SPACE 必须经过多次扫描才能获得多种对比图像,同时需注射对比剂才能获得斑块炎症血管的高信号,而 PDWI 则不能实现对比增强^[12],所以在 SPACE 序列实际应用中以 T1WI 为主,无需施加压脂技术^[13],结合压缩感知技术可以大大缩短扫描时间^[14]。SPACE 序列因存在回波链,组织边界锐利度低,需要其他成像序列来补充。

1.3 磁化准备快速梯度回波(magnetization prepared rapid acquisition gradient echo imaging, MPRAGE)序列 MPRAGE 序列的特点是利用反转恢复脉冲来抑制血液信号达到黑血效果,其图像组织边界清晰度优于 SPACE 序列,有利于斑块轮廓及闭塞形态的显示与测量。有文献表明,MPRAGE 图像在评估颈动脉硬化化区域方面具有较高的可靠性^[15],尤其是对闭塞起始部位形态诊断与数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)结果有较高的一致性^[16],能够准确诊断闭塞的形态学特征,包括斑块表面溃疡范围和表面结节数量。但 MPRAGE 对斑块内部结构的分辨率较差,特别是在细长残余管腔及钙化灶方面的识别效果不佳^[17]。IPH 的降解物高铁血红蛋白能缩短 T1 值,易被梯度回波序列检测到,因此 MPRAGE 对 IPH 的敏感性优于 SPACE 序列^[18]。有研究表明在 MPRAGE 或 SPACE 序列上,IPH 信号强度比(signal intensity ratio, SIR)与同侧急性缺血之间没有直接联系^[19]。与之相反,另一项研究认为 IPH 的 SIR 与急性脑梗死相关^[20],但是 IPH 的 SIR 与急性脑梗死之间的联系机制尚不清楚,可能受年龄因素影响,也可能是 IPH 影像包含了 IPH 和 LRNC 两种信号。今后

的研究中需要在 IPH 和 LRNC 两种高信号中进一步区分其影响。

1.4 同步非对比血管造影和斑块内出血 (simultaneous non-contrast angiography and intraplaque hemorrhage, SNAP) 序列 SNAP 序列属于梯度回波序列,适用于出血信号检测。SNAP 对 IPH 的检测比 MPRAGE 更敏感,有报道称 SNAP 对 IPH 的评估无需增加额外的序列^[21]。与 MPRAGE 相比,SNAP 的影像表现与组织学的较为一致,特别是微小的 IPH 变化,是一种新型、有效识别 IPH 的工具^[22]。此外,SNAP 还可以用于 IPH 的定量分析。Qi 等^[23]通过使用 3D 黄金角径向 k 空间采样扩展了 SNAP 技术,开发出 3D 血管壁 T1 mapping 序列,在此基础上提出一种定量 T1 标测技术,用于表征 IPH 和监测其变化。

综上,MPRAGE 与 SNAP 图像的组织边界清晰度优于 SPACE,适用于闭塞形态的显示与测量,但对斑块成分的识别不如 SPACE。在识别 IPH 方面,MPRAGE 与 SNAP 较 SPACE 有优势,SNAP 更佳,但两个序列在血液抑制方面有待提高,对 LRNC 和钙化的诊断效果有限。可利用定量磁化率图(quantitative susceptibility mapping,QSM)区分 IPH、LRNC、钙化,识别易损性斑块^[24]。

2 CICAO 患者的脑血流动力学评估

CICAO 的脑血流动力学变化包含侧支循环代偿和脑血管储备(cerebrovascular reserve,CVR)两方面。侧支循环代偿是脑组织在缺血状态下,通过开放旁路血管给缺血脑组织供血的能力。CVR 也叫血管反应性,是指在缺血状态下,机体通过自身调节使小动脉和毛细血管扩张或收缩,维持脑血流的稳定。分为 4 期:一期为侧支循环储备期,脑血流量(cerebral blood flow,CBF)、脑血容量(cerebral blood volume,CBV)、氧摄取分数(oxygen extraction fraction,OEF)正常;二期为脑血流储备期,灌注压(cerebral perfusion pressure,CPP)、CBF、OEF 正常,而 CBV 升高;三期为脑代谢储备期,大脑自身调节能力耗尽,CBF 下降,而 CBV、OEF 上升,在 MRI 图像上表现为半暗带;四期为脑梗死期,CPP 持续下降,CBF、CBV 下降,而 OEF 进一步升高,在 MRI 图像上表现为梗死核心区^[25]。目前用于评估脑血流动力学序列分述如下:

2.1 灌注加权成像(perfusion-weighted imaging,PWI)序列 PWI 是获得 CBV、CBF、平均通过时间(mean transit time,MTT)、达峰时间(time to peak,TTP)等毛细血管灌注参数的一种成像技术,适用于无创评估 CVR。PWI 分为动态磁敏感对比(dynamic susceptibility

contrast,DSC)和动脉自旋标记(arterial spin labeling,ASL)两种。其中 DSC 是通过静脉注射外源性对比剂,用快速成像序列检测得 T2* 衰减的时间-信号曲线,再经后处理计算出灌注参数的一种成像技术,是最早应用于脑灌注评估的成像方法。Songsang 等^[26]用 DSC 和血气水平依赖成像(blood oxygen level-dependent,BOLD)评估 CBF,其研究结果表明基于 DSC 和 CVR 变化的治疗方案对高风险 CICAO 有效,但预测复发性缺血性梗死的发生率尚不明确。DSC 优点是信噪比稳定,组织结构成像清晰,可定量分析,但需注射对比剂,不适用于肾功能不全患者。ASL 通过用射频脉冲对血液进行标记,将血液用作内源性对比剂,不需要外源性对比剂,可适用于肾功能不全患者。早期研究表明,ASL 可以用于评估超急性缺血患者,得出的 PWI/扩散加权成像(diffusion-weighted imaging,DWI)不匹配与 DSC 相当^[27],然而标记后延迟时间(post-label delay,PLD)值不同,则 CBF 值也不同:当 PLD < 动脉传递时间(arterial transit time,ATT)时,CBF 被低估,出现动脉通过伪影(arterial transit artifact,ATA)。因此,在评估血液延迟流入大脑,应注意 ATA 导致低估脑灌注,夸大半暗带。然而,有研究表明 ATA 的出现提示侧支循环开放,在远端软脑膜侧支循环评估结果与 DSA 相一致^[28]。原因是侧支循环血管流速较慢,延迟到达相应的血管分布区域,在 ASL 上表现为高信号。也有学者利用 ATA 评估 CICAO 患者近期症状及预后的关系,区分症状性和无症状性狭窄,结果表明 ATA 与颈动脉狭窄患者近期出现缺血症状相关^[29]。

2.2 BOLD 序列 BOLD 最早是在 1990 年由 Ogawa 等^[30]提出,可反映局部脑组织氧代谢,通过可逆性横向弛豫率测量可得到脑感兴趣区域 OEF 值,获得脑灌注信息。韩建秀等^[31]研究结果表明,TTP 与 BOLD 信号延迟的相关性最高,BOLD 信号延迟可以评估缺血性卒中患者的灌注结果。Little 等^[32]基于大鼠模型的研究结果表明,在评估半暗带方面,DWI-OEF 不匹配比 DWI-CBF 不匹配更准确。可能的原因是基于 BOLD 得出的 OEF 值不受水肿或炎症因素干扰,说明 BOLD 在半暗带的界定有临床应用价值。Khalil 等^[33]研究表明再通术前后的病变区中 BOLD 延迟与 TTP 有较高的一致性,BOLD 可以无创监测脑血流动力学的纵向变化。与 DSC 相比,BOLD 不需要对比剂,评估半暗带效果也较佳,有可能成为 DSC 的替代方案,但 BOLD 容易受自发性神经元活动、头部运动、呼吸和心功能、血液 CO₂ 的波动影响。

2.3 体素内不相干运动成像(intravoxel incoherent

motion, IVIM) 序列与弥散峰度成像 (diffusion kurtosis imaging, DKI) 序列 IVIM 概念最早由 Le Bihan^[34] 提出, 用来解释毛细血管中血流的运动, 称为伪扩散运动, 其代表水分子在血管中的灌注。标准的 IVIM 是一个双 e 指数模型, 同时考虑了细胞间隙中水分子的布朗运动和血管中水分子的灌注, 其参数有真弥散系数 (D)、假弥散系数 (D^*) 和灌注分数 (f)。IVIM 参数与 PWI 参数有较好的相关性, 一项前瞻性研究表明, IVIM 的 fD^* 和 PWI 的 CBF 显示出很好的一致性, D^* 和 f 可以用于灌注评估, 也可用于缺血核心与缺血半暗带的鉴别^[35]。日本学者通过 IVIM 与单光子发射计算机断层扫描 (single photon emission computed tomography, SPECT) 对比研究^[36], 结果表明 f 可以评估单侧颈动脉狭窄患者的 CVR 受损, 具有较高灵敏度和特异度。b 值的设置是 IVIM 成像的关键因素, b 值个数多, 精度提高, 但成像时间也会增加。目前行业内 b 值的数量和范围尚未形成标准化, 需要更多的研究进一步规范。关于再通术后出血预测的研究较少, 如果未来的 IVIM 研究能够在这方面取得突破, 将对提高 CICO 患者的生存率和降低致残率起到很大的作用。DKI 不仅量化了扩散率, 还量化了偏离高斯扩散曲线的程度, 不仅能区分坏死核心区与半暗带, 还能细化半暗带的内边界^[37], 平均峰度系数 (mean kurtosis, MK)/平均弥散率 (mean diffusivity, MD) 错配区有可能是半暗带, 而非核心区, 有可能是可挽救的缺血性病变^[38]。目前 DKI 在缺血性病变的研究还存在扫描时间长、信噪比低等局限性, 需要更多的研究验证, 对缺血半暗带重新认识。

综上, DSC 成像快速, 应用广泛, 但需要对比剂; ASL 不需要对比剂, 但需要注意设置 PLD 值, 在评估血流量较低且 ATT 较长的白质的 CBF 时, 需注意区分良性缺血和梗死区; DSC 和 ASL 均依赖于动脉输入功能, 易受大血管信号的影响; BOLD 是 MRI 中唯一能监测到 OEF 值的序列; IVIM 一次扫描可得到弥散及灌注信息, 且信号几乎全部来源于毛细血管, 不受大血管信号的影响, 但 b 值设定尚未形成行业标准化; DKI 可以细化半暗带内边界, 但扫描时间长, 信噪比低。未来需要更多的研究来完善这些成像技术的不足。

2.4 侧支循环评估序列 侧支循环代偿可增加半暗带, 在再通术的指征评估中扮演着重要的角色。Connolly 等^[39] 认为 Willis 环的前、后交通动脉为主要的侧支循环通路, 郝晓勇等^[40] 研究发现 Willis 动脉环的完整性与 CBF 值密切相关。缺乏有效侧支循

环代偿, CICO 患者亚群的卒中复发风险明显高于总体水平^[41-43]。且侧支循环影响急性脑卒中患者的静脉溶栓疗效及预后^[44]。TOF-MRA 可以评估 Willis 环的完整性, 但对眼动脉及软脑膜血管网的显示能力较差, 需要结合其他序列征象及灌注参数。用于评估侧支循环的特殊征象有高信号血管征 (hyperintense vessel sign, HVS) 和不对称皮质静脉征 (asymmetrical cortical vein sign, ACVS) 两种, 其中 HVS 是指在液体衰减反转恢复 (fluid attenuated inversion recovery, FLAIR) 序列图像上出现几个连续水平的蛇形或斑点状高信号, 与侧支循环的开放有关, 最先由 Cosnard 等^[45] 提出。后续有研究认为 HVS 与临床预后之间的关系不一致^[46], 可能在研究中忽略了灌注衰竭因素。Zhang 等^[47] 将 T2-FLAIR 结合 ASL 评估侧支循环, 结果表明 HVS 水平越高, 侧支循环越多, 但不等于侧支循环有效。由此得出, 有效循环评估除了关注 HVS, 还需结合灌注参数。ACVS 表现为在磁敏感加权成像 (susceptibility-weighted imaging, SWI) 图像上缺血侧大脑皮质静脉信号多于和 (或) 大于健侧静脉信号, 常见于血管严重狭窄的患者。ACVS 反映了脑灌注不足, 可作为评估软脑膜侧支循环的可靠指标^[48]。总之, HVS 及 ACVS 对软脑膜侧支循环的评估有一定作用, 但需要结合灌注参数, 才能准确评估侧支循环的有效性。一般认为软脑膜侧支循环可以防止慢性微结构缺血组织损伤, 但有学者使用 T2 mapping 和 DSC 评估软脑膜侧支循环保护作用的有效性, 用 CBF/CBV 替代 CPP, 结果表明, 软脑膜侧支血管丰富度增加, 不足以补偿慢性缺血性微结构皮质组织损伤^[49]。Zarrinkoob 等^[49] 用四维相位对比 MRI (four dimensional phase contrast, 4DPCMRI) 结合 T2 mapping 评估侧支循环路径, 结果表明通过血流速度可区分脑动脉和眼动脉, 从而追踪眼动脉路径。然而, 大脑表面软脑膜血管网分布复杂, 常用的 MRI 序列很难追踪其路径, 4DPCMRI 与 T2 mapping 有望在追踪软脑膜侧支循环路径方面显露优势。

3 小结

SPACE、MPRAGE、SNAP 序列已经广泛应用于 CICO 患者的血管斑块评估中, 各有优缺点, 单一序列无法准确区分斑块成分, 需要多种序列综合分析, 扫描时间长。期望在更高的场强平台上出现新的成像技术, 优化扫描协议, 提高诊断准确性。关于再通术后出血预测, 需要进行更深入探索。脑血流动力学评估侧重于区分半暗带与梗死核心区, PWI/DWI 不配率是目前较理想的方法, 但仍存在错配。虽然 BOLD、IVIM、DKI 序列在界定半暗带上的准确性得到改善,

但需要更多的研究验证,尤其后处理软件与人工智能相结合的研究还有待开展。

参考文献

- [1] Brasiense LB, Albuquerque FC, Spetzler RF, et al. Advances and innovations in revascularization of extracranial vertebral artery[J]. *Neurosurgery*, 2014,74 Suppl 1:S102 – S115.
- [2] Flaherty ML, Flemming KD, McClelland R, et al. Population-based study of symptomatic internal carotid artery occlusion: incidence and long-term follow-up[J]. *Stroke*, 2004,35(8):e349 – e352.
- [3] Persoon S, Luijckx MJ, de Borst GJ, et al. Symptomatic internal carotid artery occlusion: a long-term follow-up study[J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2011,82(5):521 – 526.
- [4] Brinjikji W, Huston J 3rd, Rabinstein AA, et al. Contemporary carotid imaging: from degree of stenosis to plaque vulnerability[J]. *J Neurosurg*, 2016,124(1):27 – 42.
- [5] Mulchan N, Yeun P, Frontera J, et al. Endovascular revascularization of multi segment chronically occluded ICA[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2022,31(8):106551.
- [6] 中国医师协会介入医师分会神经介入专业委员会,中华医学会放射学分会介入放射学组,中国卒中学会复合介入神经外科分会,等.慢性颈内动脉闭塞再通治疗中国专家共识[J]. *中华介入放射学电子杂志*,2019,7(1):1 – 6.
- [7] Hasan D, Zanaty M, Starke RM, et al. Feasibility, safety, and changes in systolic blood pressure associated with endovascular revascularization of symptomatic and chronically occluded cervical internal carotid artery using a newly suggested radiographic classification of chronically occluded cervical internal carotid artery: pilot study[J]. *J Neurosurg*, 2018,130(5):1468 – 1477.
- [8] Myrcha P, Glowiczki P. A systematic review of endovascular treatment for chronic total occlusion of the internal carotid artery[J]. *Ann Transl Med*, 2021,9(14):1203.
- [9] Weber J, Veith P, Jung B, et al. MR angiography at 3 Tesla to assess proximal internal carotid artery stenoses: contrast-enhanced or 3D time-of-flight MR angiography? [J]. *Clin Neuroradiol*, 2015,25(1):41 – 48.
- [10] Jiang Y, Peng W, Tian B, et al. Identification and quantitative assessment of different components of intracranial atherosclerotic plaque by ex vivo 3T high-resolution multicontrast MRI[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017,38(9):1716 – 1722.
- [11] Lindenholz A, van der Kolk AG, Zwanenburg JJM, et al. The use and pitfalls of intracranial vessel wall imaging: how we do it[J]. *Radiology*, 2018,286(1):12 – 28.
- [12] Mandell DM, Mossa-Basha M, Qiao Y, et al. Intracranial vessel wall MRI: principles and expert consensus recommendations of the American Society of Neuroradiology[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017,38(2):218 – 229.
- [13] Wu Y, Li F, Wang Y, et al. High-resolution vessel wall magnetic resonance imaging of the middle cerebral artery: comparison of 3D CUBE T1-weighted sequence with and without fat suppression[J]. *Med Sci Monit*, 2020,26:e928931.
- [14] Jia S, Zhang L, Ren L, et al. Joint intracranial and carotid vessel wall imaging in 5 minutes using compressed sensing accelerated DANTE-SPACE[J]. *Eur Radiol*, 2020,30(1):119 – 127.
- [15] Murata K, Murata N, Chu B, et al. Characterization of carotid atherosclerotic plaques using 3-dimensional MERGE magnetic resonance imaging and correlation with stroke risk factors[J]. *Stroke*, 2020,51(2):475 – 480.
- [16] Zhang J, Ding S, Zhao H, et al. Evaluation of chronic carotid artery occlusion by non-contrast 3D-MERGE MR vessel wall imaging: comparison with 3D-TOF-MRA, contrast-enhanced MRA, and DSA[J]. *Eur Radiol*, 2020,30(11):5805 – 5814.
- [17] 张进,孙贝贝,李晓,等.三维磁共振管壁成像与数字减影血管造影诊断颈动脉闭塞的对照研究[J]. *中国医学影像学杂志*,2020,28(4):313 – 316.
- [18] Zhang N, Zhang L, Yang Q, et al. A fast screening protocol for carotid plaques imaging using 3D multi-contrast MRI without contrast agent[J]. *Magn Reson Imaging*, 2017,39:89 – 97.
- [19] Larson AS, Brinjikji W, Kroll NJ, et al. Normalized intraplaque hemorrhage signal on MP-RAGE as a marker for acute ischemic neurological events[J]. *Neuroradiol J*, 2022,35(1):112 – 118.
- [20] Yang D, Liu Y, Han Y, et al. Signal of carotid intraplaque hemorrhage on MR T1-weighted imaging: association with acute cerebral infarct[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2020,41(5):836 – 843.
- [21] Kim MJ, Kwak HS, Hwang SB, et al. One-step evaluation of intraplaque hemorrhage in the carotid artery and vertebrobasilar artery using simultaneous non-contrast angiography and intraplaque hemorrhage[J]. *Eur J Radiol*, 2021,141:109824.
- [22] Li D, Qiao H, Han Y, et al. Histological validation of simultaneous non-contrast angiography and intraplaque hemorrhage imaging(SNAP) for characterizing carotid intraplaque hemorrhage[J]. *Eur Radiol*, 2021,31(5):3106 – 3115.
- [23] Qi H, Sun J, Qiao H, et al. Carotid intraplaque hemorrhage imaging with quantitative vessel wall T1 mapping: technical development and initial experience[J]. *Radiology*, 2018,287(1):276 – 284.
- [24] Ikebe Y, Ishimaru H, Imai H, et al. Quantitative susceptibility mapping for carotid atherosclerotic plaques: a pilot study[J]. *Magn Reson Med Sci*, 2020,19(2):135 – 140.
- [25] 王拥军.适应与代偿[J]. *中国卒中杂志*,2007,2(8):641 – 643.
- [26] Songsaeng D, Sriyapai A, Sakarunchai I, et al. Fate of patients with chronic cerebrovascular steno-occlusive disease according to change of cerebral perfusion, cerebrovascular reserved, and incidence of recurrent ischemic stroke[J]. *Asian J Neurosurg*, 2020,15(3):566 – 572.
- [27] Schlaug G, Benfield A, Baird AE, et al. The ischemic penumbra: operationally defined by diffusion and perfusion MRI[J]. *Neurology*, 1999,53(7):1528 – 1537.
- [28] Morofuji Y, Horie N, Tateishi Y, et al. Arterial spin labeling magnetic resonance imaging can identify the occlusion site and collateral perfusion in patients with acute ischemic stroke: comparison with digital subtraction angiography[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2019,48(1-2):70 – 76.
- [29] Di Napoli A, Cheng SF, Gregson J, et al. Arterial spin labeling MRI

- in carotid stenosis: arterial transit artifacts may predict symptoms[J]. *Radiology*, 2020,297(3):652–660.
- [30] Ogawa S, Lee TM, Kay AR, et al. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 1990,87(24):9868–9872.
- [31] 韩建秀, 蒯鸿儒, 牛向宏. 动态磁化率对比增强磁共振成像和血氧水平依赖功能磁共振成像在脑卒中患者诊治中的应用[J]. *心脑血管病防治*, 2018,18(4):301–303,309.
- [32] Little PV, Kraft SE, Chireh A, et al. Oxygen metabolism MRI—a comparison with perfusion imaging in a rat model of MCA branch occlusion and reperfusion[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2020,40(11):2315–2327.
- [33] Khalil AA, Villringer K, Filleböck V, et al. Non-invasive monitoring of longitudinal changes in cerebral hemodynamics in acute ischemic stroke using BOLD signal delay[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2020,40(1):23–34.
- [34] Le Bihan D. What can we see with IVIM MRI? [J]. *Neuroimage*, 2019,187:56–67.
- [35] Zhu G, Federau C, Wintermark M, et al. Comparison of MRI IVIM and MR perfusion imaging in acute ischemic stroke due to large vessel occlusion[J]. *Int J Stroke*, 2020,15(3):332–342.
- [36] Uwano I, Kobayashi M, Setta K, et al. Assessment of impaired cerebrovascular reactivity in chronic cerebral ischemia using intravoxel incoherent motion magnetic resonance imaging[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2021,30(12):106107.
- [37] Cheung J, Doerr M, Hu R, et al. Refined ischemic penumbra imaging with tissue pH and diffusion kurtosis magnetic resonance imaging[J]. *Transl Stroke Res*, 2021,12(5):742–753.
- [38] Sun H, Wu Y, Liu N, et al. Tissue perfusion of the kurtosis/diffusion mismatch differs from the central core and peripheral regions in acute cerebral infarction patients[J]. *Acta Radiol*, 2023,64(3):1155–1165.
- [39] Connolly F, Röhl JE, Lopez-Prieto J, et al. Pattern of activated pathways and quality of collateral status in patients with symptomatic internal carotid artery occlusion[J]. *Cerebrovasc Dis*, 2019,48(3-6):244–250.
- [40] 郝晓勇, 吴江, 杨朝慧, 等. ASL 灌注成像评价无症状型单侧颈内动脉重度狭窄或闭塞老年患者脑血流动力学改变及 Willis 环侧支代偿作用[J]. *放射学实践*, 2020,35(4):462–466.
- [41] Park BJ, Kim KM, Lee WJ, et al. Clinical significance of the circle of willis in patients with symptomatic internal carotid artery occlusion [J]. *World Neurosurg*, 2018,115:e585–e591.
- [42] Zhao H, Wang B, Xu G, et al. Collateral grade of the Willis' circle predicts outcomes of acute intracranial internal carotid artery occlusion before thrombectomy[J]. *Brain Behav*, 2019,9(12):e01452.
- [43] Papaioannou TG, Kalantzis C, Katsianos E, et al. Personalized assessment of the coronary atherosclerotic arteries by intravascular ultrasound imaging: hunting the vulnerable plaque[J]. *J Pers Med*, 2019,9(1):8.
- [44] 黄光坚, 高文, 覃惠洵, 等. 脑侧支循环对急性脑梗死患者静脉溶栓疗效及预后的影响[J]. *中国临床新医学*, 2021,14(9):888–892.
- [45] Cosnard G, Duprez T, Grandin C, et al. Fast FLAIR sequence for detecting major vascular abnormalities during the hyperacute phase of stroke: a comparison with MR angiography[J]. *Neuroradiology*, 1999,41(5):342–346.
- [46] Ahn SJ, Lee KY, Ahn SS, et al. Can FLAIR hyperintense vessel (FHV) signs be influenced by varying MR parameters and flow velocities? A flow phantom analysis[J]. *Acta Radiol*, 2016,57(5):580–586.
- [47] Zhang M, Shi Q, Yue Y, et al. Evaluation of T2-FLAIR combined with ASL on the collateral circulation of acute ischemic stroke[J]. *Neurol Sci*, 2022,43(8):4891–4900.
- [48] Zhan YH, Chen YK, Li RX, et al. Cortical venous changes on susceptibility-weighted imaging predict the cerebral collateral circulation as confirmed by digital subtraction angiography[J]. *Front Neurol*, 2021,12:691430.
- [49] Zarrinkoob L, Wählin A, Ambarki K, et al. Quantification and mapping of cerebral hemodynamics before and after carotid endarterectomy, using four-dimensional flow magnetic resonance imaging[J]. *J Vasc Surg*, 2021,74(3):910–920. e1.
- [收稿日期 2023–04–20][本文编辑 吕文娟 余军]

本文引用格式

梁冬玲, 冯汝静, 邓德茂. 慢性颈内动脉闭塞患者血管斑块和脑血流动力学评估的 MRI 研究新进展[J]. *中国临床新医学*, 2023,16(4):342–347.