

高分辨率磁共振血管壁成像在颅内动脉夹层中的应用进展

易丽荣, 向波*

重庆医科大学附属永川医院放射科, 重庆

收稿日期: 2024年3月17日; 录用日期: 2024年4月11日; 发布日期: 2024年4月18日

摘要

颅内动脉夹层(Intracranial arterial dissection, IAD)是中青年卒中的主要病因之一, IAD可导致严重的脑缺血或蛛网膜下腔出血。高分辨磁共振血管壁成像(High-resolution magnetic resonance vascular wall imaging, HR-VWI)可以直接显示血管壁特征, 大大提高了IAD的检出率, 本文就颅内动脉夹层在HR-VWI上的影像学表现进行分析, 并对HR-VWI技术在IAD的鉴别诊断、疾病分期与风险以及指导治疗方面进行综述。

关键词

颅内动脉夹层, 高分辨磁共振血管壁成像

Application Progress of High-Resolution Magnetic Resonance Vascular Wall Imaging in Intracranial Arterial Dissection

Lirong Yi, Bo Xiang*

Department of Radiology, The Affiliated Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Mar. 17th, 2024; accepted: Apr. 11th, 2024; published: Apr. 18th, 2024

Abstract

Intracranial arterial dissection (IAD) is one of the main causes of stroke in young and middle-aged adults. IAD can lead to severe cerebral ischemia or subarachnoid hemorrhage. High-resolution

*通讯作者。

magnetic resonance vascular wall imaging (HR-VWI) can directly display the characteristics of the vascular wall, which greatly improves the detection rate of IAD. This paper analyzes the imaging findings of intracranial arterial dissection on HR-VWI, and reviews the application of HR-VWI technology in the differential diagnosis, disease staging and risk, and guidance for the treatment of IAD.

Keywords

Intracranial Arterial Dissection, High Resolution Magnetic Resonance Vascular Wall Imaging

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

颅内动脉夹层(intracranial artery dissection, IAD)是指颅内动脉由于自发性或创伤性原因发生内弹性膜破裂, 血液流入致使管壁剥离分层形成的管壁结构异常, 最终可造成动脉狭窄、闭塞或动脉瘤样改变[1]。流行病学显示, 约 50%~60% IAD 患者发生蛛网膜下腔出血, 而 30%~78% 合并缺血性卒中, 且在中青年脑卒中患者中 IAD 占比可高达 25% [2] [3], 是中青年卒中主要病因之一, 因此对其早期诊断非常重要。然而, 由于颅内动脉纤细、走行迂曲, 传统的管腔成像对其检出率仍然较低[4]。近年来, 高分辨率磁共振血管壁成像(high resolution magnetic resonance vessel wall imaging, HR-VWI)以其无创、高分辨率、多参数、重复性强的优势逐渐受到临床关注, 在脑血管疾病诊断中拥有巨大前景[4] [5]。较传统管腔成像而言, 该技术不仅提供了管腔信息, 还提供了对血管壁形态学和病理成分定量定性分析的可能, 极大提高了 IAD 的检出率, 很好的弥补了 DSA、CTA 等在临床诊断中的不足。本文就 HR-VWI 在 IAD 的影像学特点及临床应用价值方面进行综述。

2. HR-VWI 技术简要介绍

颅内动脉血管壁成像由于颅内动脉管径纤细、走行高度迂曲、管壁菲薄的特点, 较颅外动脉存在更大挑战, 技术要求也更为严格[6] [7]。由于高场强的磁共振与多通道头颈线圈很大程度上改善了磁共振成像的信噪比, 提高了空间分辨率, 因此更推荐 3.0T 甚至未来更高场强的 7.0T 磁共振应用于脑血管病的诊疗与临床研究[8] [9]。此外, 对颅内血管壁的成像, 脑脊液与血液信号抑制是至关重要的。良好的血液和脑脊液抑制技术可以避免血流伪影造成假性管壁异常, 能够正确评价血管边界, 目前临床常用自旋回波(TSE)和双反转恢复预脉冲(DIR)达到抑制目的。但 DIR 序列容易出现流动伪影且采集时间长, 在层厚较大时抑制效果不够理想[10]。对于 3D 黑血序列而言, 更常用具有可变翻转角度重新聚焦脉冲的涡轮自旋回波序列[9] [10] (variable flip angle fast/turbo spin-echo, VFA-FSE/TSE)。总体而言, 不同厂成像序列参数与命名略有不同, 但原理并无差异, 如 SPACE 序列(Siemens Healthcare)、CUBE 序列(GE Healthcare)、VISTA 序列(Philips Healthcare)等。

3. 颅内动脉夹层的 HR-VWI 影像学特点及鉴别

颅内动脉夹层在亚裔人群中常好发于后循环, 且较前循环动脉夹层更容易发生蛛网膜下腔出血[11] [12]; 其诊断目前为止仍是以数字血管造影 DSA 检查为金标准, 能够动态观察管腔形态与侧枝血流情况。

典型 IAD 在 DSA 影像上的特点为不规则或节段性狭窄、锥形闭塞、串珠征或线样征、假腔对比剂滞留以及双腔征[13], 但由于其不能显示血管壁情况, 可能存在一定漏诊误诊情况, 难以与动脉粥样硬化导致的狭窄鉴别, 不能很好观察到管径正常的夹层病变与瘤样扩张夹层全貌, 对管腔形态异常征象显示率不高, 尤其是累及了颅内细小动脉分支时更加难以准确显示, 多以管腔串珠状、线样改变为依据间接诊断[14] [15]。因此, 仅仅依靠传统管腔成像不能完全满足临床精准治疗的需求。Jaewon Shin 等人对 312 例 DSA 及 CTA 诊断为颅内动脉粥样硬化狭窄(intracranial atherosclerotic stenosis, ICAS)患者行 HR-VWI 检查中发现, 其中 113 例患者事实上是颅内动脉夹层[16]; 相关研究也报道经常规管腔成像诊断为颅内动脉粥样硬化狭窄病例中存在近 2/3 为颅内动脉夹层[17]。由此可见, 对血管管壁成像具有独特优势的 HR-VWI 技术有助于及时辅助 IAD 准确诊断, 减少漏诊误诊发生。

3.1. 内膜瓣与双腔征

内膜瓣与真假双腔形成是颅内动脉夹层在 HR-VWI 上的最为常见的直接征象[14] [18], 是由于动脉壁内膜损伤分离所形成。在常规黑血序列 T1 加权相上内膜瓣呈与血管壁相连的线样或花瓣样等或稍高信号, 但由于血流伪影的和内膜瓣厚度的影响, 其检出率仅为 42% [19]。而在 T2 加权相及对比剂增强后, 内膜瓣检出率可以明显提高至 91%、91.4% [19] [20]。因此多序列与对比剂的联合可以有效提升夹层的诊断率。同时, 对各向同性的 3D 序列多方位重建, 可以有效避免伪影影响, 对观察管腔内线样信号是否与管壁相连更为准确[20]。双腔征作为夹层的典型表现, 可作为诊断依据。假腔由于缓慢血流的流入与积聚容易扩张压迫真腔, 导致真腔变窄或闭塞, 在 T1 加权相上血流缓慢容易形成湍流而呈不均匀高信号, 真腔则呈流空信号, 假腔内不稳定的血流动力学促进血栓形成, 从而促进夹层进展。双腔征在 HR-VWI 上检出率高达 82.8% [14], 而在传统 DSA 检查中仅 10%左右的 IDA 可观察到[13] [21], 这也可能是长久以来人们缺乏对 IAD 认识的原因之一。一项比较 HR-VWI 与 DSA 检查在 IAD 的诊断率的研究结果也证明了 HR-VWI 能提供更为详细的解剖信息, 其最终诊断一致性更高[18]。说明 HR-VWI 在颅内动脉夹层的诊断上有着巨大潜力与前景。

3.2. 壁内血肿与血栓形成

壁内血肿(intramural hematoma, IMH)是 IAD 典型表现, HR-VWI 可以直接观察到 IMH 所导致的血管外径扩张和管壁新月形增厚, 从而致使真腔受压移位[22]。当 IMH 与真腔相通时, 血流的冲击作用导致血肿部分脱落栓塞远端血管管腔; 部分发展为慢性生长的 IMH 可造成血管壁长期反复剥离出血, 最终形成合并部分血栓的巨大夹层动脉瘤[3] [23]。IMH 由氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白组成, 其信号在磁共振上具有一定的变化规律。有研究显示, IMH 在发病后 40 天内 T1 加权相上呈明显高信号, 8 天在 T2 加权相上呈高信号, 并且其信号强度在 1 个月左右逐渐降低; 大约 80% 3 个月后不再检测到 IMH, 6 个月后基本吸收完全[24]。根据发病时间将 IMH 分为急性期(<7 天)、亚急性期(7~2 个月)和慢性期(>2 个月), 发现急性期与亚急性期 IMH 显示效果明显优于慢性期, 检出率可达 85.7% [22] [25]。此外, 不同磁共振扫描技术对 IMH 检出也存在一定差异。有学者提出磁敏感加权成像诊断 IMH 灵敏度高, 但由于磁敏感伪影和血流流速影响, 获得的管壁和管腔不能充分区分, 从而降低了磁敏感加权成像对 IMH 的检出率[26] [27]。运动敏化驱动平衡(motion-sensitized driven-equilibrium, MSDE)利用流动质子的散相原理, 可以获得较好的薄层黑血图像, 即使是小动脉中较小的壁内血肿也能显示[27] [28], 已有研究证实其在椎动脉颅内段夹层中具有更加良好的诊断性能[29]。三维同步非增强血管造影和斑块内出血(three-dimensional simultaneous non-contrast angiography and intra-plaque hemorrhage, 3D-SNAP)技术对管腔血栓及血管壁的出血更加敏感, 对 IMH 及假腔内血栓检出率高于其它序列[30]。新的磁共振技术以及参数优化后成像序列

的应用可以提供更多图像信息, 更好提高 IAD 诊断准确。

3.3. 鉴别诊断

颅内动脉粥样硬化病变在亚洲人群发病率较高, 当继发斑块内出血是常常需要与 IAD 导致的壁内血肿进行鉴别。夹层通常累及范围较广, 斑块累及范围较小, 若斑块体积较大时, 多能够观察到斑块的成分, 如脂质核、疏松基质等, 并且在 T1 加权像上斑块信号多低于壁间血肿[22]。结合黑血 T2 加权像, 能够更清楚的观察到低信号假腔的存在, 进一步与高信号的斑块内出血进行鉴别[31]。其次, 夹层累及的血管外径多有轻度扩张, 范围也较大, 而粥样硬化斑块累及的血管即使是发生管径增粗的正性重构改变, 其扩张程度相对不明显, 两者间的重构指数是存在差异的[32]。

多项研究发现 IAD 累及血管在 HR-VWI 成像上可以见到管壁强化[14] [33], 当管壁环周强化时与血管炎表现类似, 鉴别存在一定困难。但 IAD 管壁的强化程度多高于原发性血管炎, 大多呈同心圆样强化; 而原发性血管炎的强化呈相对均匀、光滑的向心性强化, 常常呈多节段分布[34] [35]。对可疑 IAD 病变, 结合多序列参数及多方位重建观察, 确保各个角度清晰显示管腔及管壁改变可以最大程度减少其漏诊误诊概率。

4. HR-VWI 在颅内动脉夹层诊疗中的临床应用价值

4.1. 评估疾病分期与风险

动脉夹层是血管管壁不断破坏、修复的过程, 病理生理学上, IAD 可分为四种类型: I型(经典型)、II型(局部扩张型)、III型(冗长扩张型)以及IV型(巨大夹层动脉瘤型) [36]。这四种类型之间随着病程的演变发展可互相转换, 在 HR-VWI 上随时间发展而呈不同表现。多项研究发现[37] [38], 急性期与慢性期 IAD 影像表现存在显著差异, 内膜瓣、双腔征、瘤样扩张及壁内血肿出现率或者信号强度随发病时间递减, 壁内血肿信号强度及管壁强化程度在急性期较高, 而慢性期减弱; Satoshi Hosoki 等[39]对不同时期壁内血肿检出率观察发现其信号强度在 1~2 周内可达到峰值。因此根据其 HR-MRI 影像学表现可以为 IAD 的临床分期提供帮助, 并且, 相较于 DSA 而言, HR-VWI 可以更全面的评估破裂风险较高、容易导致占位效应的 III、IV 型夹层。

此外, 研究显示 IAD 患者合并较大的年龄、高血压以及壁内血肿时更容易出现脑缺血症状[33], 颈动脉夹层中腔内血栓强化与卒中的发生及复发相关[40], 在临床工作中对该类患者或许需要更积极的随访检测及药物治疗。有学者根据 HR-VWI 成像上管壁形态学改变将慢性期 IAD 转归分为完全修复、完全修复伴有微小管壁改变、不完全修复伴有微小管壁改变、夹层动脉瘤以及闭塞五种临床结局[41], 而这些变化是常规管腔成像不能检测到的; 且在该研究中发现 IAD 发展为闭塞者管腔直径减小、管壁弥漫性强化, 并出现了脑缺血症状, 虽然这一结局不能独立评价 IAD 预后, 但提示了管壁强化在病理上可能与活动期炎症反应相关, 此处病变破裂风险更高[42], 因此通过 HR-VWI 对 IAD 随访能有效监测病情进展情况, 发现疾病的微小变化, 以提示及时进行干预, 在最大程度上避免通过 DSA 随访可能造成的夹层进展等并发症。

4.2. 评估疗效与指导血管内治疗

在 IAD 不断破坏、修复交替的过程中, 通过 HR-VWI 对其形态、成分的监测可以评价患者病情的稳定性。随访不同治疗方案下壁间血肿、腔内血栓的信号变化, 夹层累及范围以及形态改变是否趋于修复或恶化, 从而筛选出行之有效的个体化治疗策略。对椎基底动脉夹层动脉瘤栓塞术后的患者随访发现, 支架覆盖和弹簧圈栓塞不理想的区域可观察到血管管壁强化, 并且是预测 IDA 进展的独立危险因素[43],

而这是 DSA 技术不能提供的信息。因此, HR-VWI 可通过提供管壁信息, 弥补传统管腔成像的不足, 以更全面评估 IAD 的治疗效果。

在指导血管内治疗方面, 有学者认为 HRMR-VWI 可作为动脉夹层血管内治疗前评估及治疗后首选的无创随访手段[44]。HR MRI 提供了更丰富解剖学信息, 如内膜瓣的形态、假腔的入口、壁内血肿的大小和分支血管的开口位置等, 更全面的观察夹层的走行, 避免 DSA 由于不能全面观察壁内血肿所导致的测量误差, 指导选择合适的支架型号、栓塞范围以及栓塞材料, 减少对侧枝血管的损伤。并且, 通过治疗后随访, 可以发现影响不同血管内治疗预后因素和不良预后表现, 以早期进行血管内治疗后的干预。

5. 小结与展望

总之, HR-VWI 作为目前唯一能够在活体内观察血管壁结构的无创影像学检查, 可以较好观察颅内动脉夹层管壁管腔的变化, 有助于对 IAD 病理生理及自然病程转归的全面理解, 进一步从影像学上阐述 IAD 的发病机制, 以提高该病的早期诊断率, 协助制订个体化治疗方案, 改善临床预后。但是, HR-VWI 图像的高空间分辨率与图像质量以及扫描时间三者的协调平衡往往存在一定挑战, 可以满足临床诊断需要以及科研需求的图像质量往往需要较长的扫描时间和患者的高度配合, 因此优化 HR-MRI 扫描序列是一个不小的挑战。在未来, 或许可以结合深度学习重建算法进一步提高改善图像质量, 借助人工智能技术更准确、有效的提高 IAD 诊断率。

参考文献

- [1] Lu, J., Liu, W. and Zhao, H. (2020) Headache in Cerebrovascular Diseases. *Stroke and Vascular Neurology*, **5**, 205-210. <https://doi.org/10.1136/svn-2020-000333>
- [2] Vidale, S. (2020) Headache in Cervicocerebral Artery Dissection. *Neurological Sciences*, **41**, 395-399. <https://doi.org/10.1007/s10072-020-04651-8>
- [3] Bond, K.M., Krings, T., Lanzino, G., et al. (2021) Intracranial Dissections: A Pictorial Review of Pathophysiology, Imaging Features, and Natural History. *Journal of Neuroradiology*, **48**, 176-188. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2020.03.007>
- [4] 马泽兰, 霍梦娟, 刘国清. 高分辨 MR 血管壁成像在颅内动脉夹层中的应用进展[J]. 中风与神经疾病杂志, 2021, 38(6): 567-569.
- [5] 王旭超, 于洪昌, 刘瑾瑾. 磁共振血管壁成像在颅内动脉疾病评估中的研究进展[J]. 中国血液流变学杂志, 2023, 33(2): 315-320.
- [6] Mandell, D.M., Mossa-Basha, M., Qiao, Y., et al. (2017) Intracranial Vessel Wall MRI: Principles and Expert Consensus Recommendations of the American Society of Neuroradiology. *American Journal of Neuroradiology*, **38**, 218-229. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A4893>
- [7] Saba, L., Yuan, C., Hatsukami, T.S., et al. (2018) Carotid Artery Wall Imaging: Perspective and Guidelines from the ASNR Vessel Wall Imaging Study Group and Expert Consensus Recommendations of the American Society of Neuroradiology. *American Journal of Neuroradiology*, **39**, E9-E31. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A5488>
- [8] 杨渊博, 李忠豪, 刘蕾, 谢国喜, 冯衍秋. ApoE^{-/-}小鼠三维 DANTE-FLASH 颈动脉血管壁成像: 基于 7.0T 磁共振技术[J]. 南方医科大学学报, 2021, 41(2): 216-222.
- [9] 中华医学会放射学分会 MR 学组. 颅内 MR 血管壁成像技术与应用中国专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2019, 53(12): 1045-1059.
- [10] Mazzacane, F., Mazzoleni, V., Scola, E., et al. (2022) Vessel Wall Magnetic Resonance Imaging in Cerebrovascular Diseases. *Diagnostics*, **12**, Article 258. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020258>
- [11] Al-Mufti, F., Kamal, N., Damodara, N., et al. (2019) Updates in the Management of Cerebral Infarctions and Subarachnoid Hemorrhage Secondary to Intracranial Arterial Dissection: A Systematic Review. *World Neurosurgery*, **121**, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.09.153>
- [12] 徐丹, 尹琳. 脑动脉夹层的研究进展[J]. 大连医科大学学报, 2020, 42(6): 556-562, 565.
- [13] 中国医师协会神经外科医师分会神经介入专家委员会, 中国卒中学会神经介入分会, 中国医师协会神经外科医师分会青年医师委员会. 颅内动脉夹层的影像学诊断中国专家共识[J]. 中华神经外科杂志, 2016, 32(11):

1085-1094.

- [14] Wu, Q., Liu, Y., Duan, B., *et al.* (2022) Assessment of Morphological Features and Imaging Characteristics of Patients with Intracranial Artery Dissection: A High-Resolution MRI Study. *Journal of Integrative Neuroscience*, **21**, 157. <https://doi.org/10.31083/j.jin2106157>
- [15] Cho, Y.S., Choi, P.K., Seon, H.J., *et al.* (2019) Intimal Flap Detected by Three-Dimensional Curved Multiplanar Reconstruction Image in Isolated Posterior Inferior Cerebellar Artery Dissection: A Report of Two Cases. *BMC Neurology*, **19**, Article No. 74. <https://doi.org/10.1186/s12883-019-1309-3>
- [16] Shin, J., Chung, J.W., Park, M.S., *et al.* (2018) Outcomes after Ischemic Stroke Caused by Intracranial Atherosclerosis vs Dissection. *Neurology*, **91**, e1751-e1759. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000006459>
- [17] Park, M.S., Cha, J., Chung, J.W., *et al.* (2017) Arterial Dissection as a Cause of Intracranial Stenosis in East Asians. *Journal of the American College of Cardiology*, **70**, 2205-2206. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.08.048>
- [18] Ryu, J., Lee, K.M., Kim, H.G., *et al.* (2022) Diagnostic Performance of High-Resolution Vessel Wall Magnetic Resonance Imaging and Digital Subtraction Angiography in Intracranial Vertebral Artery Dissection. *Diagnostics*, **12**, Article 432. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12020432>
- [19] Wang, Y., Lou, X., Li, Y., *et al.* (2014) Imaging Investigation of Intracranial Arterial Dissecting Aneurysms by Using 3 T High-Resolution MRI and DSA: From the Interventional Neuroradiologists' View. *Acta Neurochirurgica*, **156**, 515-525. <https://doi.org/10.1007/s00701-013-1989-1>
- [20] Sui, B., Bai, X., Gao, P., *et al.* (2021) High-Resolution Vessel Wall Magnetic Resonance Imaging for Depicting Imaging Features of Unruptured Intracranial Vertebrobasilar Dissecting Aneurysms. *Journal of International Medical Research*, **49**. <https://doi.org/10.1177/0300060520977388>
- [21] Mohan, I.V. (2014) Current Optimal Assessment and Management of Carotid and Vertebral Spontaneous and Traumatic Dissection. *Angiology*, **65**, 274-283. <https://doi.org/10.1177/0003319712475154>
- [22] 朱元博, 刘鹏飞. 高分辨率磁共振管壁成像在颅内动脉夹层中的应用[J]. 中国脑血管病杂志, 2019, 16(11): 613-616.
- [23] 赵兵. 颅内动脉夹层的发病机制及影像学表现[J]. 实用放射学杂志, 2018, 34(7): 1130-1133.
- [24] Heldner, M.R., Nedelcheva, M., Yan, X., *et al.* (2015) Dynamic Changes of Intramural Hematoma in Patients with Acute Spontaneous Internal Carotid Artery Dissection. *International Journal of Stroke*, **10**, 887-892. <https://doi.org/10.1111/ijis.12553>
- [25] Ma, W., Zhou, K., Lan, B., *et al.* (2023) Imaging Investigation of Cervicocranial Artery Dissection by Using High Resolution Magnetic Resonance VWI and MRA: Qualitative and Quantitative Analysis at Different Stages. *BMC Medical Imaging*, **23**, Article No. 184. <https://doi.org/10.1186/s12880-023-01133-z>
- [26] Kim, T.W., Choi, H.S., Koo, J., *et al.* (2013) Intramural Hematoma Detection by Susceptibility-Weighted Imaging in Intracranial Vertebral Artery Dissection. *Cerebrovascular Diseases*, **36**, 292-298. <https://doi.org/10.1159/000354811>
- [27] Hakimi, R. and Sivakumar, S. (2019) Imaging of Carotid Dissection. *Current Pain and Headache Reports*, **23**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1007/s11916-019-0741-9>
- [28] 李希茂, 陶黎, 蔡焰, 龚启慧, 吕发金. 颅内血管壁成像中 MSDE 序列的参数优化研究[J]. 磁共振成像, 2022, 13(7): 112-115, 125.
- [29] Choi, J.W., Han, M., Hong, J.M., *et al.* (2018) Feasibility of Improved Motion-Sensitized Driven-Equilibrium (IMSDE) Prepared 3D T1-Weighted Imaging in the Diagnosis of Vertebrobasilar Artery Dissection. *Journal of Neuroradiology*, **45**, 186-191. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2017.11.006>
- [30] Tang, M., Gao, J., Gao, J., *et al.* (2022) Evaluating Intracranial Artery Dissection by Using Three-Dimensional Simultaneous Non-Contrast Angiography and Intra-Plaque Hemorrhage High-Resolution Magnetic Resonance Imaging: A Retrospective Study. *Acta Radiologica*, **63**, 401-409. <https://doi.org/10.1177/0284185121992235>
- [31] Kim, J.H., Kwak, H.S., Hwang, S.B., *et al.* (2021) Differential Diagnosis of Intraplaque Hemorrhage and Dissection on High-Resolution MR Imaging in Patients with Focal High Signal of the Vertebrobasilar Artery on TOF Imaging. *Diagnostics*, **11**, Article 1024. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11061024>
- [32] 朱珠, 韩翔, 董强. 磁共振管壁成像在颅内动脉夹层中的应用价值[J]. 中国卒中杂志, 2017, 12(6): 506-511.
- [33] Shi, Z., Tian, X., Tian, B., *et al.* (2021) Identification of High Risk Clinical and Imaging Features for Intracranial Artery Dissection Using High-Resolution Cardiovascular Magnetic Resonance. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **23**, 74. <https://doi.org/10.1186/s12968-021-00766-9>
- [34] 柏夏薇, 吴昆华, 孟迪. 高分辨磁共振血管壁成像在颅内动脉夹层中的研究进展[J]. 国际医学放射学杂志, 2020, 43(5): 555-559.
- [35] 柴圣婷, 夏爽. 中枢神经系统血管炎的影像特征及研究进展[J]. 国际医学放射学杂志, 2019, 42(1): 54-58.

- [36] 吉喆, 马永杰, 向思诗, 耿介文, 翟晓东, 张鸿祺. 颅内夹层动脉瘤自然病史及其血管内治疗的研究进展[J]. 中国脑血管病杂志, 2020, 17(4): 211-216.
- [37] 马伟琼, 陈康胤, 林红东, 江桂华, 蓝博文. MRA 和高分辨率血管壁成像对不同时期颈颅内动脉夹层的诊断价值研究[J]. 临床放射学杂志, 2022, 41(7): 1352-1358.
- [38] Park, K.J., Jung, S.C., Kim, H.S., *et al.* (2016) Multi-Contrast High-Resolution Magnetic Resonance Findings of Spontaneous and Unruptured Intracranial Vertebral Artery Dissection: Qualitative and Quantitative Analysis According to Stages. *Cerebrovascular Diseases*, **42**, 23-31. <https://doi.org/10.1159/000444315>
- [39] Hosoki, S., Fukuda-Doi, M., Miwa, K., *et al.* (2023) Sequential Detection Rates of Intramural Hematoma for Diagnosing Spontaneous Intracranial Artery Dissection. *European Journal of Neurology*, **30**, 1320-1326. <https://doi.org/10.1111/ene.15715>
- [40] Copenrath, E., Lenz, O., Sommer, N., *et al.* (2017) Clinical Significance of Intraluminal Contrast Enhancement in Patients with Spontaneous Cervical Artery Dissection: A Black-Blood MRI Study. Klinische Relevanz der intraluminalen Kontrastmittelaufnahme bei Patienten mit spontaner arterieller Dissektion der Halsgefäße: Eine Black-Blood MRT-Studie. *RoFo*, **189**, 624-631. <https://doi.org/10.1055/s-0043-104632>
- [41] Jung, S.C., Kim, H.S., Choi, C.G., *et al.* (2018) Spontaneous and Unruptured Chronic Intracranial Artery Dissection: High-Resolution Magnetic Resonance Imaging Findings. *Clinical Neuroradiology*, **28**, 171-181. <https://doi.org/10.1007/s00062-016-0544-x>
- [42] Hashimoto, Y., Matsushige, T., Shimonaga, K., *et al.* (2020) Magnetic Resonance Vessel Wall Imaging Predicts Morphological Deterioration in Unruptured Intracranial Artery Dissection. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **29**, Article ID: 105006. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105006>
- [43] Zhang, Y., Sui, B., Liu, J., *et al.* (2018) Aneurysm Wall Enhancement on Magnetic Resonance Imaging as a Risk Factor for Progression of Unruptured Vertebrobasilar Dissecting Aneurysms after Reconstructive Endovascular Treatment. *Journal of Neurosurgery*, **128**, 747-755. <https://doi.org/10.3171/2016.11.JNS162433>
- [44] 中华医学会神经外科学分会神经介入学组, 中国医师协会神经外科医师分会神经介入专家委员会. 颅内夹层动脉瘤的血管内治疗中国专家共识[J]. 中华神经外科杂志, 2018, 34(8): 757-763.