MRI在慢性主动脉夹层诊疗中的应用研究进展

景 通,黄福华
南京医科大学附属南京医院//南京市第一医院心胸血管外科,江苏 南京 210006

摘要:主动脉夹层(AD)是一种危及生命的急性主动脉综合征,其慢性期(CAD)仍存在假腔瘤样扩张、破裂及脏器灌注不良等远期风险。MRI因其无电离辐射、多参数成像及高软组织分辨率等优势,在CAD的长期随访及血流动力学评估中展现出不可替代的优势。随着四维血流磁共振、高分辨率管壁成像等技术的发展,MRI在CAD诊疗中的作用从单纯的形态学诊断向功能学及生物力学评估转变。本文旨在对MRI在CAD形态学特征分析、血流动力学评估、管壁重构预测及腔内治疗术后随访中的应用进展进行综述,以期为临床诊疗提供理论依据。相较于既往侧重单一MRI序列或形态学随访的综述,本文进一步总结磁共振血管造影、电影磁共振成像、四维血流磁共振及高分辨率管壁成像等技术在CAD长期管理中的适用场景、参数价值与局限性,突出MRI由结构显示向结构、功能、风险预测一体化评估转化的临床价值。
关键词:慢性主动脉夹层;磁共振成像;四维血流;血管壁成像;血流动力学

Research progress on application of MRI in the diagnosis and treatment of chronic aortic dissection

JING tong, HUANG Fuhua
Department of Thoracic and Cardiovascular Surgery, Nanjing First Hospital, Nanjing Hospital Affiliated to Nanjing Medical University, Nanjing 210006, China

Abstract: Aortic dissection (AD) is a life-threatening acute aortic syndrome, and its chronic phase (CAD) carries long-term risks including pseudoaneurysmal dilatation, rupture and poor organ perfusion. MRI demonstrates irreplaceable benefits in long-term follow-up and hemodynamic assessment of CAD due to its advantages of non-ionizing radiation, multi-parameter imaging and high soft tissue resolution. With advancements in techniques such as 4D Flow MRI and high-resolution vascular wall imaging, the role of MRI in CAD diagnosis and treatment has evolved from purely morphological diagnosis to functional and biomechanical assessment. This paper aims to review the application progress of MRI for analyzing CAD morphological features, assessing hemodynamics, predicting wall reconstruction, and conducting follow-up after endovascular interventions, thereby providing theoretical support for clinical diagnosis and treatment. Compared with previous reviews mainly focusing on single MRI sequences or morphological follow-up, this review further integrates the applicable scenarios, parameter values and limitations of MRA, cine MRI, 4D Flow MRI and high-resolution vascular wall imaging in the long-term management of CAD, highlighting the incremental clinical value of MRI in shifting from structural depiction to integrated structural-functional risk prediction.
Keywords: chronic aortic dissection; magnetic resonance imaging; four-dimensional flow; vascular wall imaging; hemodynamics

主动脉夹层(AD)是指主动脉腔内血液从主动脉内膜撕裂口进入中膜,并沿着主动脉长轴延伸,导致主动脉真假腔分离的病理状态,发病时间超过14 d则定义为慢性期,随着急性期诊疗水平的提升,越来越多患者进入慢性期随访管理阶段[1]。慢性主动脉夹层(CAD)虽然主动脉撕裂趋于稳定,但残余夹层的假腔在持续的血流冲击下发生瘤样扩张,一旦破裂,死亡风险仍较高[2]。多排螺旋CT血管造影(MDCTA)扫描速度快、空间分辨率高,仍是目前AD诊断的首选工具,但在CAD患者的长期随访管理中,反复CTA检查具有较大的辐射及对比剂肾病风险[3]。MRI多模态成像技术不仅能清晰显示主动脉的解剖结构,还可对血流动力学进行定量分析,评估管壁炎症状态[4]。近年来,随着越来越多新兴MRI技术的出现,MRI在CAD诊断及随访评估中的价值日益凸显,本文就MRI在CAD诊疗中的最新研究进展作一综述。

收稿日期:2026-03-05
基金项目:江苏省卫生健康委科研项目(ZD2022018)
作者简介:景 通,在读硕士研究生,医师,E-mail: 15851852750@163.com
通信作者:黄福华,博士,主任医师,E-mail: huangfuhua@sina.cn

1 MRI在CAD中的应用基础

1.1 磁共振血管造影(MRA)

对比剂增强MRA(CE-MRA)利用顺磁性钆对比剂缩短血液T1值,可获得高信噪比的主动脉全景图像,诊断效能与CTA相当,但其在肾功能不全的CAD患者中应用受限[5, 6]。非对比剂MRA(NCE-MRA)利用真稳态进动快速成像或心电门控的三维导航波序列,可在不注射对比剂的情况下清晰显示真假腔及其与分支血管的关系,虽然空间分辨率略逊于CE-MRA,但在CAD的随访管理中具有更高的安全性[7, 8]。临床实践中,NCE-

MRA在年轻患者及高频随访患者中具有重要的应用价值,未来的研究可聚焦于在NCE-MRA高安全性的基础上,进一步缩小其与CE-MRA在空间分辨率上的差距。

1.2 电影磁共振成像(Cine MRI)

CAD患者内膜片的摆动幅度与跨膜压差密切相关,研究显示,静态内膜片通常提示真假腔压力均衡或假腔压力过高,而高幅度内膜摆动可能与远端破口未闭导致的复杂血流有关[9]。Cine MRI除了评估心脏功能之外,还可动态观察主动脉内膜片的运动情况,因此可为评估血管壁的顺应性提供直观依据[10, 11]。

1.3 四维血流磁共振(4D Flow MRI)

4D Flow MRI是近年来心血管磁共振功能成像领域的重要进展,传统的二维相位对比磁共振成像(2D PC-MRI)仅能测量单一平面的血流速度,4D Flow MRI则可在三维空间覆盖范围及心动周期时间维度内采集血流速度矢量[12, 13]。应用于CAD患者中,该技术可直观显示真假腔内的螺旋流、涡流及层流模式,并通过后处理计算血流量、壁面切应力(WSS)、能量损耗(EL)等流体力学参数,作为预测血管扩张的定量指标[14, 15]。

1.4 高分辨率管壁成像(HR-VWI)

HR-VWI可利用黑血技术抑制管腔内血流信号,从而突出显示血管壁结构。在CAD患者中,可利用HR-VWI结合增强扫描,识别内膜片及外膜的炎症反应,具体表现为管壁强化,且该征象的出现通常早于形态学改变,有望作为识别夹层进展风险的早期影像学线索[16]。但其对序列质量、血流抑制效果及判读经验要求较高,仍需结合形态学和血流动力学信息综合分析。

1.5 不同MRI技术的适用场景与局限性

从临床使用场景看,CE-MRA适用于初诊或术前需要快速获得全主动脉解剖信息、破口位置及分支关系的患者,但需权衡钆对比剂使用及肾功能限制;NCE-MRA适用于肾功能受限、年轻或需长期频繁复查者,局限在于扫描时间和空间分辨率仍受序列条件影响;Cine MRI主要用于动态观察内膜片运动、管径搏动及顺应性,不能替代全主动脉解剖评估;4D Flow MRI适合评估复杂破口、假腔残余血流及WSS、EL、PWV等定量参数,但后处理流程较长、参数阈值尚未统一;HR-VWI更适合评估管壁强化、炎症活动和易损斑块,局限在于空间分辨率、血流抑制和增强方案对结果影响较大。临床应用中,应依据患者肾功能、植入物安全性、随访频率和拟解决的临床问题进行序列组合。

2 CAD的形态学评估

2.1 破口定位

准确鉴别真假腔并定位破口是制定治疗方案的前提。MRI可利用自旋回波序列(SE)或黑血序列,根据流空效应和信号特征对真假腔进行鉴别,真腔通常流速较快,在收缩期表现为明显的流空信号;假腔则流速较慢,信号混杂[17]。在AD慢性期,假腔通常较真腔更大,且常伴随有附壁血栓,MRI通过多平面重建(MPR)可准确定位内膜破口,尤其是对于位于主动脉弓部或内脏动脉开口附近的破口,可提供更清晰的软组织对比度,减少CTA常见的骨伪影干扰[18-20]。在复杂型CAD如多发破口或螺旋形撕裂中,单纯依赖CTA通常难以明确血流的真实走向,而MRI多序列扫描则在明确主导性破口中具有不可替代的价值,对于减少术后远端假腔持续充盈至关重要。

2.2 假腔血栓化的评估

假腔内的血栓状态是影响预后的关键因素,完全血栓化通常提示预后良好,部分血栓化则是主动脉扩张及预后不良的独立危险因素,而MRI在鉴别新鲜血栓、机化血栓及慢血流中效果优于CT[21, 22]。在MRI的T1WI和T2WI序列上,不同时期的血栓有不同的信号表现,急性期表现为等T1长T2信号,亚急性期由于正铁血红蛋白生成而表现为高T1信号[23]。对于CT上难以区分的慢血流与疏松血栓,Cine MRI或相位对比序列可通过检测是否存在流动的质子信号进行精准鉴别。有研究指出,MRI检测出假腔内微通道提示内部仍有隐匿性血流,是部分血栓化的微观表现,这也是形态学检查容易遗漏的一点[24]。因此,相比于单纯描述假腔有无血栓,影像报告还应进一步提示血栓信号特征、血栓范围及是否存在微通道或残余慢血流;若随访中血栓信号由长T1逐渐转为高T1而体积未见缩小,或伴假腔残余流动信号,应警惕假腔压力持续存在及后续扩张风险,并考虑缩短随访间隔。

2.3 分支血管受累评估

CAD常累及内脏动脉及头臂血管,MRI可通过三维重建明确分支血管是起自真腔、假腔还是跨越两腔,为胸主动脉腔内修复术(TEVAR)术前规划提供重要信息。此外,MRI评估分支血管灌注情况的能力优于CTA,可结合灌注成像序列,直接评估肾脏等靶器官的缺血程度[25]。

3 基于MRI的血流动力学研究

血流动力学的改变通常早于形态学改变,因此,基于MRI的流体力学评估成为当前研究热点,也是辅助判断CAD稳定性的重要依据。

3.1 WSS检测

WSS指血液流动对血管内皮产生的摩擦力,在生理状态下,正常的WSS有助于维持内皮细胞功能,但在CAD中,因几何结构变得复杂,WSS的分布也通常出现异常。基于4D Flow MRI的研究显示,假腔内的低

WSS区域与血栓形成密切相关，高WSS区域通常位于破口对侧壁或真腔狭窄处，可诱发基质金属蛋白酶（MMPs）激活，导致中膜弹力纤维降解，从而引起血管壁薄弱及瘤样扩张[26]。另有研究表明，初始MRI检查中假腔局部WSS值高，是随访期间主动脉直径增长的独立预测因子，通过定量检测WSS，可在形态学扩张发生之前，早期识别出高危患者，并予以早期干预[27]。进一步明确WSS的异常阈值，建立风险预测模型，将是4D Flow技术走向临床常规诊疗的关键。

3.2 螺旋流和涡流分析

正常的主动脉血流呈主要层流状态，但在AD患者中，血流通过破口进入假腔后可形成螺旋流和涡流，通过4D Flow MRI可量化螺旋流密度和涡流强度。研究显示，假腔内的涡流可增加湍流动能，增加血管壁的振荡剪切力（OSI），从而阻碍血栓机化，并对血管壁造成持续的机械应力，促进假腔扩张[28]。

3.3 脉搏波传导速度（PWV）检测

慢性期夹层瓣片的存在会使主动脉顺应性发生改变，而MRI可通过高时间分辨率的相位对比（PC）序列测量升主动脉至降主动脉的PWV[29]。CAD患者由于主动脉僵硬度增加，通常表现为PWV升高，高PWV不仅增加左心室后负荷，还增加了远端内膜片承受的剪切力，是导致夹层远端延伸的重要机制，MRI可通过检测这一参数，为心血管风险评估提供重要参考[30]。

4 MRI在血管壁炎症评估中的作用

除了机械因素之外，越来越多证据表明血管壁慢性炎症也在CAD的进展中扮演重要角色。钆对比剂延迟扫描中观察到的血管壁异常强化提示滋养血管增生及炎症细胞浸润，对于CAD患者，若随访中发现假腔外壁出现持续性或新发的强化信号，则提示炎症反应活跃，可能是血管壁结构破坏、即将发生扩张或破裂的信号，文献报道显示，该征象对于急性不良事件具有较高的预测价值[31]。此外，CAD患者常合并动脉粥样硬化，而MRI对于识别不稳定斑块具有较高的特异性，比如斑块内出血在T1WI上常表现为高信号，若在破口附近识别到此类斑块，则提示斑块脱落导致栓塞的风险较大，腔内操作风险增加[32]。

5 MRI在TEVAR术前规划及术后随访中的应用

TEVAR是目前治疗AD的主流手段，影像学检查对于筛选适宜病例、明确手术方案及术后随访监测具有重要意义。CAD患者病程长，血管壁形态、内膜片质地以及血流动力学状态都可能发生较大改变，对影像学检查的要求更高[33]。

5.1 MRI在TEVAR术前评估中的应用

TEVAR治疗成功的关键在于对近端锚定区、破口位置及主要分支血管进行准确评估。常规CTA虽可清晰显示主动脉的形态，但难以准确反映血流动力学状态及血管壁病理特征，MRI则可弥补其缺陷，为TEVAR术前评估提供更丰富的信息[34]。CAD患者常存在多个破口，若未能封闭关键破口，术后即使假腔近端封闭，仍可能存在远端持续充盈，假腔压力持续升高的情况，破裂风险仍较高[35]。然而，仅通过形态学图像难以准确区分哪些是主要的流入道，哪些是流出道，4D Flow MRI则可进行功能性评估，追踪血流轨迹，定量评估各破口的血流量，准确识别起主导供血作用的近端破口，从而确定支架覆盖的最佳范围[36]。TEVAR手术要求近端锚定区血管壁健康且具有良好的顺应性，若锚定区存在易损斑块，支架释放时的径向支撑力可导致斑块破裂或脱落，诱发脑卒中等严重并发症，HR-VWI技术可清晰区分血管壁的粥样硬化斑块性质，T1加权成像及黑血序列可识别富含脂质的软斑块或斑块内出血[37]。对于拟行开窗技术或烟囱技术的复杂病例，MRI增强血管造影可提供稳定图像，帮助判断肾动脉及肋间动脉的灌注情况，为术中保留关键分支提供依据[38]。此外，CAD患者的主动脉壁通常较为僵硬，仅通过静态CTA图像测量直径可能因心动周期内的搏动变化而产生测量误差，导致支架尺寸选择不当，Cine MRI则可动态观察主动脉随心动周期的搏动幅度，通过测量收缩期与舒张期的管径变化率，计算血管顺应性及僵硬度指数，有助于更合理地选择覆膜支架型号并控制径向支撑力，从而减少术后支架源性新发破口的风险[39, 40]。上述技术可提供丰富的数据且各有侧重，在临床实际应用中，单一序列扫描难以满足CAD复杂的诊断需求，未来的发展趋势必然是探索多序列融合的一站式扫描方案，尽可能简化流程，建立标准化的术前评估参数组合，比如将无创的NCE-MRA与4D Flow MRI相结合，在一次检查中同时获取解剖与血流动力学信息，在精准评估的同时提高工作效率、缩短患者等待手术时间。

5.2 MRI在术后随访中的应用

TEVAR术后的长期随访主要关注内漏、支架移位、感染以及主动脉重塑情况。内漏是TEVAR术后最常见的并发症，其准确检出与分型是决定是否需要二次干预的重要因素[41]。常规CTA检查中，金属支架骨架会产生严重的硬化束伪影，掩盖支架内部的真实情况，同时还会干扰贴近支架外壁的内漏信号，导致漏诊[42]。MRI受金属伪影的影响较小，尤其是镍钛合金材质的支架在MRI图像上的伪影范围仅局限于支架网丝周围，支架内腔及周围软组织结构仍清晰可见[43]。利用时间分辨磁共振血管造影（TR-MRA）技术，可获得高时间分辨率的动态图像，捕捉造影剂在假腔内的充盈过程，对于鉴别锁骨下动脉或肋间动脉反流等因素引起的低流速II型

内漏及假腔内尚未机化的血栓具有重要意义[44, 45]。TR-MRA不仅能显示内漏的存在，还能显示血流的来源和方向，为临床决定是否进行栓塞治疗提供依据。

TEVAR术后的理想状态是真腔扩大、假腔血栓化并最终萎缩，常规形态学测量仅关注直径变化，而MRI可进一步分析假腔内容物的性质，通过多对比序列，可区分假腔内的新鲜血栓、机化血栓以及慢血流。研究发现，部分CAD患者术后假腔虽形成血栓，但在T2加权像上仍表现为高信号，提示血栓内部存在炎症反应或不完全机化，此类患者远期假腔扩张的风险依然较高[46, 47]。此外，4D Flow MRI在术后随访中可监测真腔内的血流模式恢复情况，理想状态下术后应伴随真腔内螺旋流和湍流减少，流线趋于层流化，同时WSS分布恢复正常，若术后仍监测到异常的高切应力区域，往往提示血管重构不良，需缩短随访间隔[48, 49]。考虑到CAD患者需长期随访，频繁CTA检查会导致辐射累积，增加致癌风险，MRI无电离辐射，尤其适合年轻患者及需长期频繁复查的病例[50]。且随着快速扫描序列的普及，单次MRI检查的时间成本正在逐渐降低，使其作为TEVAR术后首选随访手段的可行性不断提高。

6 总结和展望

综上，MRI不仅能提供准确的形态学信息，还可反映血流动力学异常、血管重构情况，是CAD长期管理中兼具结构、功能和安全性优势的重要影像工具。CAD治疗决策仍需结合患者临床表现、解剖风险、血流动力学数据及治疗可及性综合判断，MRI技术的价值不应仅体现为图像分辨率提升或参数的叠加，还应转化为可重复、可解释、可指导随访和干预时机选择的风险评估体系。然而当下MRI的临床普及仍面临一些挑战，其一是MRI扫描时间较长，伴有呼吸困难或无法长时间平卧的患者可能依从性较差；其二是体内存在旧式心脏起搏器或其他铁磁性植入物的患者存在检查禁忌或需严格评估安全性；其三是4D Flow MRI等高级后处理技术耗时较长，对硬件和操作人员要求高，目前多局限于大型研究型医院。未来研究可从3个方向落地推进：一是将压缩感知、并行采集和运动校正纳入标准化扫描方案，在自由呼吸或短屏气条件下完成NCE-MRA、4D Flow MRI及HR-VWI组合采集，以缩短检查时间并提升可重复性；二是开展多中心前瞻性研究，明确WSS、EL、PWV、假腔反流分数及管壁强化程度等参数的采集规范、跨设备校正方法和风险阈值；三是开发AI自动化分析流程，实现主动脉中心线提取、真假腔和血栓分割、破口识别、管壁强化定量及结构化报告输出，并将模型预测结果与假腔扩张、再干预及破裂等临床终点进行验证。

参考文献：

[1] Isselbacher EM, Preventza O, Hamilton Black J 3rd, et al. 2022 ACC/AHA guideline for the diagnosis and management of aortic disease: a report of the American heart association/American college of cardiology joint committee on clinical practice guidelines[J]. Circulation, 2022, 146(24): e334-482.

[2] Juraszek A, Czerny M, Rylski B. Update in aortic dissection[J]. Trends Cardiovasc Med, 2022, 32(7): 456-61.

[3] 李欣赛, 黄 萱, 褚雪倩, 等. 对比不同分型的急性主动脉夹层围手术期导致急性肾损伤的临床研究[J]. 临床肾脏病杂志, 2023, 23(2): 110-8.

[4] Raza SA, Khan A, Williams AB, et al. Imaging and surveillance of chronic aortic dissection: current practice and future directions[J]. Heart Lung Circ, 2025, 34(5): 426-34.

[5] Garg I, Grist TM, Nagpal P. MR angiography for aortic diseases[J]. Magn Reson Imaging Clin N Am, 2023, 31(3): 373-94.

[6] Ripley B, Scheidt MJ, Aghayev A, et al. ACR appropriateness criteria® thoracic aortic aneurysm or dissection-treatment planning and follow-up: 2024 update[J]. J Am Coll Radiol, 2025, 22(5): S455-78.

[7] 邓 铁, 王文静, 余 洪, 等. 磁共振成像在慢性主动脉夹层中的临床价值及研究进展[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(4): 181-3.

[8] Sherrah AG, Grieve SM, Jeremy RW, et al. MRI in chronic aortic dissection: a systematic review and future directions[J]. Front Cardiovasc Med, 2015, 2: 5.

[9] Kilinc O, Baraboo J, Engel J, et al. Aortic hemodynamics with accelerated dual-venc 4D flow MRI in type B aortic dissection[J]. Appl Sci (Basel), 2023, 13(10): 6202.

[10] Nguyen LA, Houriez-Gombaud-Saintonge S, Puymirat E, et al. Aortic stiffness measured from either 2D/4D flow and cine MRI or applanation tonometry in coronary artery disease: a case-control study[J]. J Clin Med, 2023, 12(11): 3643.

[11] van Bogerijen GHW, Williams DM, Patel HJ. Importance of dynamic aortic evaluation in planning thoracic endovascular aortic repair[J]. Ann Cardiothorac Surg, 2014, 3(3): 300-6.

[12] Koo HJ, Ha H, Lee GH, et al. Evaluation of aortic diseases using four-dimensional flow magnetic resonance imaging[J]. Vasc Specialist Int, 2024, 40: 41.

[13] François CJ, Markl M, Schiebler ML, et al. Four-dimensional, flow-sensitive magnetic resonance imaging of blood flow patterns in thoracic aortic dissections[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2013, 145 (5): 1359-66.

[14] Kilinc O, Chu S, Baraboo J, et al. Hemodynamic evaluation of type B aortic dissection using compressed sensing accelerated 4D flow MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2023, 57(6): 1752-63.

[15] Oyama-Manabe N, Aikawa T, Tsuneta S, et al. Clinical applications of 4D flow MR imaging in aortic valvular and congenital heart disease[J]. Magn Reson Med Sci, 2022, 21(2): 319-26.

[16] Munoz C, Fotaki A, Hua A, et al. Simultaneous highly efficient contrast-free lumen and vessel wall MR imaging for anatomical assessment of aortic disease[J]. J Magn Reson Imaging, 2023, 58 (4): 1110-22.

[17] Baliga RR, Nienaber CA, Bossone E, et al. The role of imaging in aortic dissection and related syndromes[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2014, 7(4): 406-24.

[18] Liu SZ, Engel JS, Bisen JB, et al. Entry tear hemodynamics using 4D flow MRI in a patient with acute type B aortic dissection[J]. Radiol Case Rep, 2023, 18(3): 1037-40.

[19] Armour C, Guo BL, Saitta S, et al. The role of multiple re-entry tears in type B aortic dissection progression: a longitudinal study using a controlled swine model[J]. J Endovasc Ther, 2024, 31(1): 104-14.

[20] Zimmermann J, Bäumler K, Loecher M, et al. Hemodynamic effects of entry and exit tear size in aortic dissection evaluated with *in vitro* magnetic resonance imaging and fluid – structure interaction simulation[J]. Sci Rep, 2023, 13: 22557.

[21] Evangelista A, Pineda V, Guala A, et al. False lumen flow assessment by magnetic resonance imaging and long-term outcomes in uncomplicated aortic dissection[J]. J Am Coll Cardiol, 2022, 79 (24): 2415-27.

[22] Ruiz-Muñoz A, Guala A, Dux-Santoy L, et al. False lumen hemodynamics and partial thrombosis in chronic aortic dissection of the descending aorta[J]. Eur Radiol, 2024, 34(8): 5190-200.

[23] Tsai TT, Evangelista A, Nienaber CA, et al. Partial thrombosis of the false lumen in patients with acute type B aortic dissection[J]. N Engl J Med, 2007, 357(4): 349-59.

[24] Trojan M, Rengier F, Kotelis D, et al. Time-resolved three-dimensional contrast-enhanced magnetic resonance angiography in patients with chronic expanding and stable aortic dissections[J]. Contrast Medium Mol Imaging, 2017, 2017: 5428914.

[25] 弓文清, 胥 盼, 杨 旭, 等. 急性主动脉夹层累及肾动脉的影像学特征[J]. 中国医学影像学杂志, 2022, 30(4): 373-7.

[26] Veger HTC, Westenberg JJM, de Heer LM, et al. Wall shear stress assessment of the false lumen in acute type B aortic dissection using 4D flow MRI[J]. Magn Reson Imaging, 2021, 80: 46-54.

[27] Marlevi D, Sotelo JA, Grogan-Kaylor R, et al. False lumen pressure estimation in type B aortic dissection using 4D flow cardiovascular magnetic resonance: comparisons with aortic growth[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1): 51.

[28] Ruiz-Muñoz A, Guala A, Dux-Santoy L, et al. False lumen rotational flow and aortic stiffness are associated with aortic growth rate in patients with chronic aortic dissection of the descending aorta: a 4D flow cardiovascular magnetic resonance study[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2022, 24(1): 20.

[29] Stokes C, Haupt F, Becker D, et al. The influence of minor aortic branches in patient-specific flow simulations of type-B aortic dissection[J]. Ann Biomed Eng, 2023, 51(7): 1627-44.

[30] Wang QD, Guo XJ, Hornsey E, et al. Performance of respiratory gated 4D flow MRI with adaptive k-space reordering in healthy controls and aortic dissection: reproducibility and agreement with 2D phase contrast MRI[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2025, 41(2): 211-23.

[31] Kuzniar M, Wanhainen A, Tegler G, et al. Longitudinal assessment of inflammatory activity in acute type B aortic dissection with integrated fluorodeoxyglucose positron emission tomography/magnetic resonance imaging[J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2023, 66 (3): 323-31.

[32] Syed MB, Fletcher AJ, Forsythe RO, et al. Emerging techniques in atherosclerosis imaging[J]. Br J Radiol, 2019, 92(1103): 20180309.

[33] Higuchi S, Sato Y, Ota H, et al. Identification of Adamkiewicz artery by 4D flow MRI and intra-arterial ultra-high-resolution CT angiography in preoperative assessment of patients with chronic aortic dissection: a case report[J]. Radiol Case Rep, 2025, 20(3): 1581-5.

[34] Righini P, Secchi F, Mazzaccaro D, et al. Four-dimensional flow MRI for the evaluation of aortic endovascular graft: a pilot study[J]. Diagnostics, 2023, 13(12): 2113.

[35] Lin XH, Guo W, She DJ, et al. Initial and follow-up high-resolution vessel wall MRI study of spontaneous cervicocranial artery dissection[J]. Eur Radiol, 2024, 34(3): 1704-15.

[36] Guo BL, Pirola S, Guo DQ, et al. Hemodynamic evaluation using four-dimensional flow magnetic resonance imaging for a patient with multichanneled aortic dissection[J]. J Vasc Surg Cases Innov Tech, 2018, 4(1): 67-71.

[37] Tritanon O, Mataeng S, Apirakkan M, et al. Utility of high-resolution magnetic resonance vessel wall imaging in differentiating between atherosclerotic plaques, vasculitis, and arterial dissection [J]. Neuroradiology, 2023, 65(3): 441-51.

[38] Takehara Y. Clinical application of 4D flow MR imaging for the abdominal aorta[J]. Magn Reson Med Sci, 2022, 21(2): 354-64.

[39] Wang KH, Armour CH, Guo BL, et al. A new method for scaling inlet flow waveform in hemodynamic analysis of aortic dissection [J]. Int J Numer Meth Biomed Eng, 2024, 40(9): e3855.

[40] 范伟雄, 张添辉, 钟 炜, 等. MRI人工智能辅助压缩感知心脏电影序列在心功能评估中的应用价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2024, 22 (9): 79-81.

[41] Stoecker JB, Glaser JD. Review of type III endoleaks[J]. Semin Intervent Radiol, 2020, 37(4): 371-6.

[42] Kazimierczak W, Serafin Z, Kazimierczak N, et al. Contemporary imaging methods for the follow-up after endovascular abdominal aneurysm repair: a review[J]. Videosurgery Other Miniinvasive Tech, 2018: 1-11.

[43] van der Laan MJ, Bartels LW, Viergever MA, et al. Computed tomography versus magnetic resonance imaging of endoleaks after EVAR[J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2006, 32(4): 361-5.

[44] Lookstein RA, Goldman J, Pukin L, et al. Time-resolved magnetic resonance angiography as a noninvasive method to characterize endoleaks: initial results compared with conventional angiography [J]. J Vasc Surg, 2004, 39(1): 27-33.

[45] Cohen EI, Weinreb DB, Siegelbaum RH, et al. Time-resolved MR angiography for the classification of endoleaks after endovascular aneurysm repair[J]. J Magn Reson Imaging, 2008, 27(3): 500-3.

[46] Secchi F, Capra D, Monti CB, et al. Safe follow-up after endovascular aortic repair with unenhanced MRI: the SAFEVAR study[J]. Diagnostics, 2023, 13(1): 20.

[47] 郭宝磊, 符伟国, 郭大乔, 等. 基于四维血流磁共振成像技术的胸主动脉夹层血流定性和定量分析[J]. 上海医学, 2022, 45(6): 418-23.

[48] Flanagan CP, Kim AS, Ramirez JL, et al. Low rates of aortic surveillance imaging and clinical follow-up in patients with acute aortic dissection[J]. J Vasc Surg, 2025, 81(4): 847-55. e2.

[49] Liu Y, Mu XL, Wang YX, et al. The role of 4D flow MRI-derived wall shear stress in aortic disease: a comprehensive review[J]. Rev Cardiovasc Med, 2025, 26(3): 26735.

[50] European Society of Radiology. White paper on radiation protection by the European Society of Radiology[J]. Insights Imaging, 2011, 2 (4): 357-62.

（编辑：郎 朗）