

· 综 述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2021.04.035

网络首发 [https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.R.20201126.0845.002.html\(2020-11-26\)](https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.R.20201126.0845.002.html(2020-11-26))

4D Flow MRI 在心血管系统的研究进展*

刘 倩 综述,唐茁月[△]审校

(中国科学院大学重庆医院/重庆市人民医院,重庆 400014)

[摘要] 磁共振成像已成为心血管疾病患者临床评估的重要工具之一,而具有沿 3 个血流方向速度编码和三维解剖覆盖的四维血流磁共振成像(4D Flow MRI)在心血管疾病的生理病理学改变、危险分层、治疗方案优化及随访工作中具有重要价值,该文就 4D Flow MRI 的成像原理、特点及其在心血管系统临床应用的研究进展及不足进行综述。

[关键词] 磁共振成像;相位对比技术;心血管系统;血流动力学;综述

[中图分类号] R445.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2021)04-0698-06

Advances in 4D Flow MRI in cardiovascular system*

LIU Qian, TANG Zhuoyue[△]

(Chongqing General Hospital, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400014, China)

[Abstract] Magnetic resonance imaging has become an important tool for the clinical evaluation of patients with cardiovascular disease. Four-dimensional magnetic resonance imaging (4D Flow MRI), with velocity encoding along all three flow directions and three-dimensional anatomic coverage, has great value for the physiological and pathological changes, risk stratification, treatment optimization and follow-up of cardiovascular diseases. This review is to describe the image-forming principle, characteristics, clinical application and deficiency of this technique in cardiovascular system.

[Key words] magnetic resonance imaging; phase contrast technique; cardiovascular system; hemodynamics; review

目前心血管系统的常规检查包括多普勒超声、CT 血管成像及数字减影血管造影(DSA)等技术,但多普勒超声测量精度和重复性高度依赖于设备和操作员的经验,且多局限于二维速度场的测量;CT 血管成像及 DSA 有创、需要注入对比剂,且获得的是平均速度信息。而四维血流磁共振成像(4D Flow MRI)以无创、无需对比剂增强、覆盖范围广、可获得血管形态学及血流动力学参数等优势在心血管系统的研究中存在巨大潜力,它可以提供一系列血流参数:壁切变应力(WSS)、压差、涡流动能、流速及流量等,通过三维空间内速度矢量的改变,以流速图、流线图及迹线图三维可视化形式描述血流状态与变化。众多研究表明利用 4D Flow MRI 技术可更好地了解心血管生理学和病理生理学机制^[1-2],发掘血流动力学对心脏和血管系统的影响,进一步描述血流变化导致心血管病进展(如重塑)的程度,以及评估介入或外科手

术后生理流量和压力曲线恢复程度。

1 成像原理及特点

1.1 成像原理

速度编码的基本原理是基于核磁信号相位沿梯度磁场的变化,获得相位旋转与固定自旋的对比数据,通过使用适度的双极速度编码梯度、与速度相关的不同信号相位,但其他方面相同的序列参数来检测血流相关的相位变化,再通过相位差的方法得到三维像素上的速度,这种方法称为相位对比(PC)磁共振技术。4D Flow MRI 是在三维成像的基础上加上时间,即动态的三维成像技术。

1.2 特点

1.2.1 技术特点

在 4D Flow MRI 中,对于单向速度编码及定量速度测量需要 2 次采集和 1 次减法。通过交错 4 点速度编码可以有效地实现 3 个方向的速度测量,该交

* 基金项目:重庆市科卫联合医学科研重点项目(2019ZDXM010);重庆市基础与前沿研究计划项目(cste2016jcyjA0294);重庆市医学科研计划重点项目(20141016)。 作者简介:刘倩(1995—),住院医师,本科,主要从事头颈及腹部影像研究。 [△] 通信作者,E-mail:zhuoyue_tang@ucas.ac.cn。

错 4 点速度编码沿 3 个正交(x、y、z)方向获取 1 个参考图像和 3 个速度编码图像速度,并在整个心脏周期中沿所有 3 个空间维度进行编码,从而提供时间分辨的 3D 速度场。

1.2.2 设备特点

能够对血管系统进行全容积覆盖成像,并提供感兴趣区域内血管血流动力学的综合评估。

2 临床应用

2.1 颅内血管

DSA 是明确诊断和评估脑血管疾病的金标准,具有侵入性,临床上存在一定的并发症风险。磁共振成像作为一种无创、安全的成像手段,在脑血管病的诊断、治疗计划和随访评估中发挥着越来越重要的作用。WEN 等^[3]通过对 10 名健康志愿者颅内血管的定量研究,证明 4D Flow MRI 技术在神经血管的测量中具有良好的多中心重复性、重测可靠性及较低观察者间依赖性。目前 4D Flow MRI 技术在颅内血管病变中的研究主要集中在颅内动脉瘤及动静脉畸形(AVM)。

将 4D Flow MRI 的定性和定量流动行为与其他检测方法相比较,如计算流体动力学(CFD)、经颅多普勒(TCD),发现其具有良好的一致性。颅内动脉瘤是一种危及生命的高风险疾病,如何权衡动脉瘤破裂风险及手术风险是医患共同关注点,MIURA 等^[4]研究发现只有较低的 WSS 与大脑中动脉动脉瘤的破裂显著相关。众所周知,通过干预使动脉瘤内血流减少可促进动脉瘤内血栓的形成,并最终促进动脉粥样硬化,从而极大降低动脉瘤破裂风险达到治愈的目的。近年来,低孔率支架(FDS)运用上述理念通过降低孔率来改变载瘤动脉内的血流动力学,达到载瘤动脉血管重建、瘤内血栓形成及瘤颈部血管内皮化的目的而治愈动脉瘤。PEREIRA 等^[5]运用 4D Flow MRI 对 FDS 植入后动脉瘤内血流动力学的变化进行研究,发现其可定量计算动脉瘤内血流量减少的程度,并确定与动脉瘤血栓完全形成相关的速度阈值,这项研究证明 4D Flow MRI 可以很好地改善 FDS 治疗后的结果预测。

AVM 是由异常的“动脉化”引流静脉与供血动脉直接相连组成的错综复杂的网络,是出血性中风的重要病因。颅内血管常规检查对其检出率较高,但在危险分层及治疗中存在不足。对 AVM 的供血动脉和引流静脉的详细评估对于临床评估和管理很重要,使用 4D Flow MRI 可以通过量化感兴趣的血管的相对血流量来帮助描述供血动脉的类型和分布。以类似的方式,4D Flow MRI 可用于静脉解剖的评估,将静脉狭窄识别为局部静脉血流加速的区域及 WSS 引起的病理过程的风险区域。高流量引流静脉狭窄被认

为会引起 AVM 病灶内血流的重新分配,导致血流动力学过载,从而增加破裂的风险^[6]。大而高流量的脑动静脉畸形通常采用连续血管内栓塞治疗,以逐渐减少畸形的血供。因此,4D Flow MRI 提供的 AVM 血管系统的定量血流数据在治疗计划中具有重要的价值,因为其试图识别流量最高的供血动脉,从而有可能实现有效和有针对性的栓塞。此外,治疗后的脑血流信息可用于评估治疗效果和生理反应^[7]。ANSA-RI 等^[8]发现 4D Flow MRI 可对 AVM 血流动力学进行定性和定量评估,并为风险分层、分期栓塞过程中更精确的监测或改进治疗计划提供可能。但这是一个可行性研究,关于这些发现的临床应用,结论是有限的。其在进一步的研究中发现 AVM 血流参数与 Spetzler-Martin 分级及周围微血管灌注显著相关^[9]。但其研究样本量小,需要更大样本量的队列研究,以研究综合 MR 成像评估脑血流和灌注的潜力,进而改善 AVM 风险分层。

除此之外,4D Flow MRI 还应用于颅内动脉粥样硬化(ICAD)、阿尔茨海默病(AD)及镰状细胞病(SCD)的颅内血流动力学的研究,VALI 等^[10]研究证实了双静脉 4D Flow MRI 和半自动血流分析工具评价 ICAD 患者颅内血流动力学的可行性。RIVERA-RIVERA 等^[11-12]研究证明了 4D Flow MRI 对 AD 大血管区域进行血流动力学分析的可行性,并进一步研究发现 AD 患者较健康人平均血流量(MBF)降低,搏动指数(PI)、抵抗性指数(RI)升高,提示 AD 患者血流动能降低,加深了对 AD 发病机制的了解。与健康组相比,4D Flow MRI 能提供 SCD 患者整个生命周期的血流动力学变化^[13]。

颅内血管迂曲、管径较小,4D Flow MRI 在颅内的空间分辨率有限,且与主动脉相比,颅内血管容易受到部分容积效应的影响。其次,定位感兴趣的颅内血管并确定其血流方向是具有挑战性的,并由此可能导致测量误差。相较于对心脏、主动脉及其周围大血管和门静脉系统的 4D Flow MRI 的重复性研究,神经血管的研究样本量较少,但 4D Flow MRI 在颅内血管成像的潜力是不可否认的。

2.2 主、肺动脉及心脏

磁共振成像通常用于心脏和大血管的评估,精确的解剖成像是大多数临床评估的目标。然而,随着相位对比磁共振成像的进展,一系列的血流动力学分析成为可能,在对心脏和大血管正常血流动力学的研究基础上,4D Flow MRI 优势在于(1)使用独特的血流动力学标志物在有临床表现之前识别心血管疾病的早期过程,以便能够进行预防性治疗;(2)改进或丰富对心血管疾病的评估,以便更好地进行危险分层及确定最佳的内科或外科治疗方案;(3)加强对不同治疗

方案的血流动力学影响的评估和监测。

肺动脉高压(PH)是一种致命性疾病,其特征是平均肺动脉压(MPAP)异常升高,最终导致右心室衰竭,有创右心导管插管是其诊断的金标准。肺动脉因高血压而变硬,这种僵硬可以使用包括脉动性和顺应性在内的一系列测量用磁共振来量化。血管顺应性的降低与肺动脉扩张一起导致 PH 逆行血流。4D flow MRI 不仅可分析 PH 血管僵硬和返流的时间和范围,还可发现其表现为异常和特征性的复杂血流模式,主肺动脉内的涡流与明显的 PH 密切相关,且涡流的持续时间与静息平均肺动脉压相关^[14]。

Fontan 循环是对于只有一个功能心室的患者的姑息性治疗,单个功能心室用于系统泵血,体静脉回流通过全腔肺动脉连接直接分流到肺动脉。Fontan 循环连接处血流分布不对称被怀疑会导致肺血管的动静脉畸形,从而导致手术并发症。JARVIS 等^[15]研究证明了 4D Flow MRI 用于 Fontan 循环血流动力学靶向性评价的可行性,包括通过从下腔静脉和上腔静脉发出路径显示复杂的血流模式、血流分布的量化和血管几何形状的评估。CHENG 等^[16]应用 4D Flow MRI 在 Fontan 循环的体外模型中发现,与具有不依赖剪切黏度的牛顿流体相比,具有剪切黏度的非牛顿流体显著地改变了定性流动模式、功率损失、肺内流动分布和腔内流动混合。这些影响是由血管几何形状、心输出量和腔静脉流量的不对称性以复杂和高度非线性方式调节的。4D Flow MRI 主要潜力可能在于评估肺动脉血流的差异性,其对每条肺动脉上的上腔静脉和下腔静脉的贡献可以通过定量的路径分析来确定,自动定量血流的腔静脉贡献可以提高 Fontan 患者的术后评估。

生理性涡流有助于稳定血流,保存能量,保护血管免受动脉粥样硬化的影响,但病理性涡流则有害。主要表现为(1)轴向流速因涡流而降低,因此,单位时间内流经恒定血管截面的血液较少,可能导致器官灌注减少或心脏做功增加。(2)病理性涡流可能对血管壁施加张力,导致血管扩张或内皮功能紊乱。(3)血小板在涡流中的速度降低,可能会促进血凝块或血栓形成^[17]。而病理性涡流在主动脉病变中常见于二叶主动脉瓣(BAV)。4D Flow MRI 已成功地应用于生理涡流定量、病理血流改变的识别,可直观地探索时间分辨速度向量场的涡流特征^[18]。ROSE 等^[19]使用 4D Flow MRI 测量 BAV 患者的收缩期峰值速度符合临床参考标准多普勒超声心动图。但因其采用三维速度编码的快速容积分析,比多普勒超声心动图更能适应偏心血流喷射的峰值速度的评估。BAV 是主动脉扩张的因素之一,HOPE 等^[20]发现 BAV 收缩期血流偏心的程度与进行性主动脉扩张之间有很好的相

关性。不同瓣膜表型的 BAV 患者的血流模式不同,利用 4D Flow MRI 评估不同的 WSS 成分和衍生的血流参数可能有助于更完整、准确地确定主动脉扩张风险^[21]。故 4D flow MRI 可用于识别主动脉扩张和可能伴有 BAV 和主动脉瓣疾病的夹层患者的进展风险。

跨瓣梯度、瓣膜面积和峰值速度是主动脉瓣狭窄(AS)目前常用的 3 个超声测量参数,但 4D Flow MRI 对主动脉峰值速度和派生的压力梯度的量化可能更好,这是评估 AS 严重程度的重要指标。超声心动图测量的跨瓣膜能量损失可以为无症状 AS 患者提供独立、额外的预后信息,在此背景下,4D Flow MRI 研究提出了两种评估血液能量学的方法:黏性能量损失和湍流动能(TKE)^[22]。BARKER 等^[23]研究表明,与健康志愿者相比,AS 患者的胸主动脉黏性能量损失显著增加,表明心脏后负荷增加是由于 AS 的异常血流。TKE 考虑了每个成像体素内的速度波动,且因此反映了由 AS 施加于心室所增加的工作负荷。计算主动脉中的 TKE 可以直观地显示 AS 患者升主动脉湍流程度的增加。故基于 4D Flow MRI 的湍流图来确定狭窄上的不可逆能量损失,以及其评估血流诱导的血液损伤的有效性是重要的^[24]。

4D Flow MRI 也应用于主动脉缩窄(CoA)及马方综合征(MFS)的血流动力学评估。胡立伟等^[25]研究发现主动脉能量损失和狭窄段近端的涡流大小有关。狭窄段位置、涡流大小和局部血管壁 WSS 的升高是早期影响 CoA 术后血管顺应性下降的重要因素之一。MFS 主动脉中层变性使患者主动脉扩张、夹层和破裂的风险大大增加。通过脉搏波传播速度(PWV)可以发现 MFS 患者的主动脉病变节段明显变硬并预测进行性主动脉扩张和评估治疗反应^[26]。GEIGER 等^[27]亦发现 MFS 降主动脉内段的节段性 WSS 降低与局部异常血流模式增加和主动脉夹层的直径增大有关。

心内血流复杂,4D Flow MRI 可以全容积覆盖以评估心脏的血流动力学变化,ERIKSSON 等^[28]入组 10 名健康人和 10 名扩张型心肌病患者,通过积分每帧左心室容积上的压力梯度计算出整个心脏周期内整体血流动力学的大小和方向,发现 4D Flow MRI 数据可以量化作用于心肌的左心室血流动力学,是研究进行性心脏不良重塑的一种新工具。且 VAN 等^[29]证明联合应用增强前后 T1 Mapping 和 4D Flow MRI 成像可以表征肥厚型心肌病(HCM)患者血流动力学和心肌细胞外体积分数(ECV)的改变。左心室流出道峰值压力梯度和能量损失与 ECV 的相关性提示 HCM 相关血流异常、左心室后负荷增加和左心室结构重塑之间可能存在机制联系。KARLSSON 教授团

队在房颤电复律后的纵向研究中表明左心房顿抑时血流改变,血瘀升高,且此时血液的凝固性也升高^[30-31]。血瘀和高凝状态之间的联系提示,左心房 4D 血流的评估可以增加对心房顿抑时血栓形成的病理生理学理解,这可能最终导致针对每个患者的抗凝治疗时间和剂量的优化。且在心房颤动患者在转复后即刻、心房顿抑时和复律后 4 周心房机械收缩恢复正常窦性心律时左心室功能的变化进行 4D 血流特异性测量,强调心房收缩在房室耦合中的重要性。上述病变的最终进展为心力衰竭,KANSKI 等^[32]通过研究心内动能与舒张期涡环的形成、心脏不同步及心力衰竭的临床措施之间的关系,发现动能时间曲线与纽约心脏病协会(NYHA)分级或 6 min 步行试验无关,因此,可能构成一种新的心力衰竭量化方法。

虽然法洛四联症(TOF)患者的首诊检查技术是超声心动图,但其在血流定量分析中的应用受到限制,右心室几何形状较左心室复杂,在先天性心脏病中右心室功能经常受损,故 4D Flow MRI 因在复杂血流模式中具有可视化和采集体积内的任何位置回溯性分析的优势使其在法洛四联症中的运用应运而生。FRANÇOIS 等^[33]证明了 4D Flow MRI 定性和定量地分析整个右心循环的血流特征的可行性,且发现修复后的 TOF 患者的血流模式和定量血流参数与正常健康心脏明显不同。在此研究背景下,HIRTNER 等^[34]研究发现基于 4D 血流的涡流量化分析 TOF 修复术后患者心腔内血流变化是一种可替代定性血流观察的方法,心腔内涡流变化可能与右心室扩张和功能减低有关。涡流可能导致 TKE 的改变,从而导致 TOF 术后患者的心室-血管效率低下。TOF 修复术后患者的 TKE 是异常的,并且与传统的疾病进展指标有直接的、非线性的关系,可能是比传统参数更早预测无效血流动力学的指标^[35]。

2.3 腹部血管

4D Flow MRI 的主要优势是能够提供腹部的全面定性(解剖学和血流模式)和定量(血流测量)评估,作为多普勒超声的一种补充。在肝硬化患者中,肝静脉压力梯度(HVPG)的测量提供了门静脉压力的准确估计,并为慢性肝病提供了可靠的临床和预后标志,它使我们能够评估临床并发症的发展,如食管静脉曲张和出血及失代偿风险,并提供关于患者生存和未来死亡风险的独立预后信息。但肝静脉压力梯度是一项有创性测量,且具有低特异性,MOTOSUGI 等^[36]初步研究发现奇静脉血流量大于 0.1 L/min 和门静脉血流量小于 4D Flow MRI 测量的脾和肠系膜上静脉血流量之和是判断肝硬化患者胃食管静脉曲张出血风险的有用指标。ROLDÁN-ALZATE 等^[37]定量评价进餐挑战时门静脉血流的配对调节,发现门

静脉高压患者血流调节功能可能受损。正因有如此多的并发症,门静脉高压的治疗尤为重要,经颈静脉门体分流术(TIPS)可作为其终末期的治疗。BAN-NAS 等^[38]对 7 例门静脉高压症伴顽固性腹水患者在 TIPS 置入前、术后 2 周和 12 周进行 4D Flow MRI 成像,发现其用于无创纵向监测 TIPS 置入前后的肝血流是可行的。研究发现,与超声相比,4D Flow MRI 在无创性评价肾透析患者动静脉瘘血流动力学上亦是一种有前途的技术^[39]。

实际应用中,在扫描参数的确定、扫描时间、屏气过程、后处理的算法等上都存在一定的难度,如最大流速(Venc)的确定,需选择感兴趣区血管的生理速度,过大噪声增加,过小不能抗混叠,如面对多血管的扫描,最佳 Venc 值无法确定,需从临床需求中选择;而扫描时间一直是其的一个限制,多采用稀疏采样技术去改善,而对于胸部和腹部应用,呼吸控制是必要的,以最大限度地减少呼吸伪影,如自动门控技术。且大规模多中心队列研究较少,后处理算法没有一个统一的标准,此外,有限的空间分辨率限制了 4D Flow MRI 对小血管的分析。但 4D Flow MRI 血流参数的多元化,使其在颅内血管、心胸疾病中的应用利大于弊,影像科医生通过对患者血流参数的筛选、计算、评估为临床医生提供指导,改进或补充了现有的评估工具,如在心脏瓣膜疾病(VHD)中 4D Flow MRI 除了能提供解剖及功能信息,还能够提供能量损耗、TKE 及 WSS 等定量参数,提示细微血流异常,帮助临床医师更早发现 VHD 进展过程中的血流动力学改变及其对管壁和心腔的影响,为 VHD 预后及随访提供更多信息。

3 小 结

虽然 4D Flow MRI 技术采集时间长、后处理复杂、空间分辨率有限,且在胸腹部可能有呼吸伪影,但相信随着技术的发展、软件的更新、更多的病例研究,会使得 4D Flow MRI 技术在心血管系统的临床应用大放光彩。

参考文献

- [1] DYVERFELDT P, BISSELL M, BARKER A J, et al. 4D flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2015, 17:72.
- [2] 程赛楠, 赵世华. 心脏磁共振成像新技术进展与展望[J]. 磁共振成像, 2016, 7(7):541-545.
- [3] WEN B, TIAN S, CHENG J, et al. Test-retest multisite reproducibility of neurovascular 4D flow MRI[J]. J Magn Reson Imaging, 2019, 49

- (6):1543-1552.
- [4] MIURA Y, ISHIDA F, UMEDA Y, et al. Low wall shear stress is independently associated with the rupture status of middle cerebral artery aneurysms[J]. *Stroke*, 2013, 44(2): 519-521.
- [5] PEREIRA V M, DELATTRE B, BRINA O, et al. 4D flow MRI in neuroradiology: techniques and applications[J]. *Top Magn Reson Imaging*, 2016, 25(2): 81-7.
- [6] HOPE M D, PURCELL D D, HOPE T A, et al. Complete intracranial arterial and venous blood flow evaluation with 4D flow MR imaging[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2009, 30(2): 362-366.
- [7] WU C. Intracranial 4D flow magnetic resonance imaging: in vivo cerebral volumetric flow assessment and applications in cerebrovascular disease[D]. Ann Arbor: ProQuest Dissertations Publishing, 2016: 1-24.
- [8] ANSARI S A, SCHNELL S, CARROLL T, et al. Intracranial 4D flow MRI: toward individualized assessment of arteriovenous malformation hemodynamics and treatment-induced changes [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2013, 34(10): 1922-1928.
- [9] WU C, ANSARI S A, HONARMAND A R, et al. Evaluation of 4D Vascular flow and tissue perfusion in cerebral arteriovenous malformations: influence of spetzler-martin grade, Clinical presentation, and AVM risk factors [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2015, 36(6): 1142-1149.
- [10] VALI A, ARISTOVA M, VAKIL P, et al. Semi-automated analysis of 4D flow MRI to assess the hemodynamic impact of intracranial atherosclerotic disease[J]. *Magn Reson Med*, 2019, 82(2): 749-762.
- [11] RIVERA-RIVERA L A, TURSKI P, JOHNSON K M, et al. 4D flow MRI for intracranial hemodynamics assessment in Alzheimer's disease[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2016, 36(10): 1718-1730.
- [12] RIVERA-RIVERA L A, TURSKI P, JOHNSON K M, et al. Changes in intracranial venous blood flow and pulsatility in Alzheimer's disease: a 4D flow MRI study[J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2017, 36(7): 2149-2158.
- [13] VÁCLAVŮ L, BALDEW Z A V, GEVERS S, et al. Intracranial 4D flow magnetic resonance imaging reveals altered haemodynamics in sickle cell disease[J]. *Br J Haematol*, 2018, 180(3): 432-442.
- [14] HOPE M D, SEDLIC T, DYVERFELDT P. Cardiothoracic magnetic resonance flow imaging[J]. *J Thorac Imaging*, 2013, 28(4): 217-230.
- [15] JARVIS K, SCHNELL S, BARKER A J, et al. Evaluation of blood flow distribution asymmetry and vascular geometry in patients with Fontan circulation using 4D flow MRI[J]. *Pediatr Radiol*, 2016, 46: 1507-1519.
- [16] CHENG A L, WEE C P, PAHLEVAN N M, et al. A 4D Flow MRI Evaluation of the impact of shear-dependent fluid viscosity on in vitro fontan circulation flow [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2019, 327(6): 1243-1253.
- [17] SPICZAKI J V, CRELIER G, GIESE D, et al. Quantitative analysis of vortical blood flow in the thoracic aorta using 4D phase contrast MRI [J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): 0139025.
- [18] SAITTA S, PIROLA S, PIATTI F, et al. Evaluation of 4D flow MRI-based non-invasive pressure assessment in aortic coarctations[J]. *J Biomech*, 2019, 94: 13-21.
- [19] ROSE M J, JARVIS K, CHOWDHARY V, et al. Efficient method for volumetric assessment of peak blood flow velocity using 4D flow MRI [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2016, 44(6): 1673-1682.
- [20] HOPE M D, DYVERFELDT P, ACEVEDO-BOLTON G, et al. Post-stenotic dilation: evaluation of ascending aortic dilation with 4D flow MR imaging[J]. *Int J Cardiol*, 2012, 156(2): 40-42.
- [21] RODRÍGUEZ-PALOMARES J F, DUX-SANTOY L, GUALA A, et al. Aortic flow patterns and wall shear stress maps by 4D-flow cardiovascular magnetic resonance in the assessment of aortic dilatation in bicuspid aortic valve disease[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20(1): 28.
- [22] GARCIA J, BARKER A J, MARKL M. The role of imaging of flow patterns by 4D flow

- MRI in aortic stenosis[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2019, 12(2): 252-266.
- [23] BARKER A J, OOIJ P V, BANDI K, et al. Viscous energy loss in the presence of abnormal aortic flow[J]. *Magn Reson Med*, 2014, 72(3): 620-628.
- [24] HA H J, LANTZ J, ZIEGLER M, et al. Estimating the irreversible pressure drop across a stenosis by quantifying turbulence production using 4D Flow MRI[J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 46618.
- [25] 胡立伟, 彭雅枫, 孙爱敏, 等. 四维血流技术在主动脉缩窄术后血流动力学定量评估中的研究[J]. *中国医学影像学杂志*, 2019, 27(1): 6-10.
- [26] BURRIS N S, HOPE M D. 4D flow MRI applications for aortic disease[J]. *Magn Reson Imaging Clin*, 2015, 23(1): 15-23.
- [27] GEIGER J, HIRTLER D, GOTTFRIED K, et al. Longitudinal evaluation of aortic hemodynamics in marfan syndrome: new insights from a 4D flow cardiovascular magnetic resonance multi-year follow-up study [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19(33): 1-11.
- [28] ERIKSSON J, BOLGER A F, EBBERS T, et al. Assessment of left ventricular hemodynamic forces in healthy subjects and patients with dilated cardiomyopathy using 4D flow MRI[J]. *Physiol Rep*, 2016, 4(3): 12685.
- [29] VAN OOIJ P, ALLEN B D, CONTALDI C, et al. 4D flow MRI and T1-mapping: assessment of altered cardiac hemodynamics and extracellular volume fraction in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2016, 43(1): 107-114.
- [30] CIBIS M, LINDAHL T L, EBBERS T, et al. Left atrial 4D blood flow dynamics and hemostasis following electrical cardioversion of atrial fibrillation[J]. *Front Physiol*, 2017, 8: 1052.
- [31] KARLSSON L O, ERIXON H, EBBERS T, et al. Post-cardioversion improvement in LV function defined by 4D flow patterns and energetics in patients with atrial fibrillation [J]. *Front Physiol*, 2019, 10: 659.
- [32] KANSKI M, ARVIDSSON P M, TÖGER J, et al. Left ventricular fluid kinetic energy time curves in heart failure from cardiovascular magnetic resonance 4D flow data[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2015, 17: 111.
- [33] FRANÇOIS C J, SRINIVASAN S, SCHIEBLER M L, et al. 4D cardiovascular magnetic resonance velocity mapping of alterations of right heart flow patterns and main pulmonary artery hemodynamics in tetralogy of Fallot [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2012, 14(16): 1-12.
- [34] HIRTLER D, GARCIA J, BARKER A J, et al. Assessment of intracardiac flow and vorticity in the right heart of patients after repair of tetralogy of Fallot by flow-sensitive 4D MRI[J]. *Eur Radiol*, 2016, 26(10): 3598-3607.
- [35] ROBINSON J D, ROSE M J, JOH M, et al. 4D flow magnetic resonance imaging-derived energetic biomarkers are abnormal in children with repaired tetralogy of Fallot and associated with disease severity [J]. *Pediatr Radiol*, 2019, 49: 308-317.
- [36] MOTOSUGI U, ROLDÁN-ALZATE A, BANNAS P, et al. Four-dimensional Flow MRI as a marker for risk stratification of gastroesophageal varices in patients with liver cirrhosis [J]. *Radiology*, 2019, 290(1): 101-107.
- [37] ROLDÁN-ALZATE A, FRYDRYCHOWICZ A, SAID A, et al. Impaired regulation of portal venous flow in response to a meal challenge as quantified by 4D flow MRI [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 42(4): 1009-1017.
- [38] BANNAS P, ROLDÁN-ALZATE A, JOHNSON K M, et al. Longitudinal monitoring of hepatic blood flow before and after TIPS by using 4D-Flow MR imaging [J]. *Radiology*, 2016, 281(2): 574-582.
- [39] LI S Q, ZHU M L, SUO S T, et al. Assessment of the hemodynamics of autogenous arteriovenous fistulas with 4D phase contrast-based flow quantification MRI in dialysis patients [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020, 51(4): 1272-1280.