

四维血流定量测量法洛四联症患者矫正术后肺动脉瓣反流的可重复性与一致性研究

喻诗琴 陆敏杰 尹刚 杨新令 崔辰 陈秀玉 赵世华

中国医学科学院北京协和医学院国家心血管病中心阜外医院磁共振影像科 100037

通信作者:陆敏杰,Email:coolkan@163.com

【摘要】目的 探究四维血流(4D-Flow)MRI技术定量测量法洛四联症(TOF)矫正术后患者肺动脉瓣反流的可重复性,以及与常规二维血流(2D-Flow)技术、超声心动图的一致性。**方法** 连续纳入2018年5月至8月于我院接受MR检查的TOF矫正术后患者共21例,采用3.0 T MR扫描仪,同时行2D-Flow及4D-Flow序列扫描,通过Circle CVI42工作站后处理分析图像,获得肺动脉瓣血流数据。所有患者于1周内行常规二维和多普勒超声心动图检查。采用组内相关系数及Bland-Altman分析比较4D-Flow与2D-Flow的可重复性及一致性,MR与超声心动图测量肺动脉瓣反流结果的一致性采用加权Kappa系数分析。采用Pearson相关分析探究反流分数与心功能的关系。**结果** 纳入患者全部成功完成MR及超声检查。同一医师多次通过4D-Flow所测得的肺动脉前向血流量、反向血流量、反流分数ICC值分别为0.996、0.997、0.985(P 值均 <0.001),具有良好的的一致性;不同医师通过4D-Flow测量同一患者肺动脉前向血流量、反向血流量、反流分数的ICC值分别为0.993、0.994、0.968(P 值均 <0.001),一致性较好。2D-Flow与4D-Flow测量前向血流量、反向血流量及反流分数一致性较好,ICC值分别为0.954、0.913、0.721(P 值均 <0.001)。2D-Flow与4D-Flow所测得的反流分数转换为半定量结果后与超声检查结果比较均具有良好的的一致性,加权Kappa系数分别为0.897($P<0.001$)、0.710($P=0.001$)。2D-Flow所测得反流分数与心功能参数的分析结果显示右心室心指数(RVCI)、右心室舒张末期容量指数(RVEDVi)、右心室收缩末期容量指数(RVESVi)、左心室舒张末期容量指数(LVEDVi)、左心室收缩末期容量指数(LVESVi)均与反流分数存在较强的正相关关系, r 值分别为0.600、0.788、0.683、0.578、0.687(P 值均 <0.05)。4D-Flow所测得反流分数与RVCI、RVEDVi、RVESVi、LVEDVi、左心室质量指数均存在较强的正相关关系, r 值分别为0.606、0.685、0.534、0.459、0.633(P 值均 <0.05)。**结论** 4D-Flow MRI技术能够再现TOF术后患者肺动脉血流形态学及动力学特征,具有较好的可重复性,并且与传统2D-Flow及超声心动图具有一定的一致性。

【关键词】 磁共振成像; 肺动脉瓣反流; 法洛四联症

基金项目: 国家自然科学基金(81620108015, 81571647); 首都临床特色应用研究(Z161100000516110)

DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2019.09.009

Four-dimensional flow MRI quantification of pulmonary regurgitation in patients with repaired tetralogy of Fallot: a study on reproducibility and consistency

Yu Shiqin, Lu Minjie, Yin Gang, Yang Xinling, Cui Chen, Chen Xiuyu, Zhao Shihua

Department of MR, Fuwai Hospital, National Center for Cardiovascular Diseases of China, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China

Corresponding author: Lu Minjie, Email: coolkan@163.com

【Abstract】 Objective To investigate the feasibility and consistency of four-dimensional flow (4D flow) quantification of pulmonary regurgitation in patients with repaired Tetralogy of Fallot (ToF) by comparing with conventional two-dimensional flow (2D flow) and echocardiography. **Methods** Both the 4D flow and 2D flow imaging were acquired with repaired ToF (a total of 21 patients) consecutively on 3.0 T MR scanner from May 2018 to August 2018. Pulmonary flow and regurgitant fraction were measured by a commercial post processing software Circle CVI42. All patients underwent echocardiography within one

week after or before MR examination. The inter/intra-observer variability by 2D/4D flow and agreement between the two methods were investigated by interclass correlation coefficients (ICC) and Bland-Altman analyses. The agreement between MR and echocardiography were analyzed by weighted Kappa coefficient. The correlation between pulmonary regurgitation and cardiac function was also investigated by Pearson analysis. **Results** All patients were included and completed the examinations successfully. Both inter-observer and intra-observer agreement by 4D flow for total forward volume (ICC=0.993, 0.996, respectively, $P<0.001$), total backward volume (ICC=0.994, 0.997, respectively, $P<0.001$) and regurgitant fraction (ICC=0.968, 0.985, respectively, $P<0.001$) were good. The total forward volume, total backward volume and regurgitant fraction measured by 2D flow and 4D flow reached a good agreement (ICC=0.954, 0.913, 0.721, respectively, $P<0.001$). The consistency was good for severity of regurgitation measured by 2D flow (weighted Kappa=0.897, $P<0.001$) and 4D flow (weighted Kappa=0.710, $P=0.001$) compared with echocardiography. Significant correlation was found among right ventricular cardiac index ($r=0.600$, $P<0.05$), right ventricular end-diastolic volume index ($r=0.788$, $P<0.05$), right ventricular end-systolic volume index ($r=0.683$, $P<0.05$) and left ventricular end-diastolic volume index ($r=0.578$, $P<0.05$), left ventricular end-systolic volume index ($r=0.687$, $P<0.05$) with regurgitant fraction measured by 2D flow. Regurgitant fraction measured by 4D flow had a significant correlation with right ventricular cardiac index ($r=0.606$, $P<0.05$), right ventricular end-diastolic volume index ($r=0.685$, $P<0.05$), right ventricular end-systolic volume index ($r=0.534$, $P<0.05$) and left ventricular end-diastolic volume index ($r=0.459$, $P<0.05$), left ventricular mass index ($r=0.633$, $P<0.05$). **Conclusion** 4D flow MRI provides highly reproducible measurements of pulmonary flow on morphology and haemodynamics in patients with repaired ToF compared with 2D flow MRI and echocardiography.

【 Key words 】 Magnetic resonance imaging; Pulmonary regurgitation; Tetralogy of Fallot

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81620108015, 81571647); Beijing Municipal Science & Technology Funds (Z161100000516110)

DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2019.09.009

法洛四联症 (TOF) 矫正术后肺动脉瓣关闭不全所致的反流被认为与远期预后有关, 包括进行性的运动耐量下降、右心衰竭甚至全心衰竭、室性心律失常及猝死^[1-2]。超声心动图是临床最常用的评估心脏血流及功能的无创检查, 但是对于右心室功能及肺动脉瓣血流的评估具有一定的局限性^[3]。传统二维相位对比血流电影 (2D-Flow) MRI 技术已经应用于临床定量评估心脏瓣膜病变, 但 2D-Flow 只能编码单一血流方向, 而不能准确评估 TOF 矫正术后通过病变瓣膜复杂的多方向血流^[4]。另外, 2D-Flow 需要精确的扫描定位, 操作者依赖性强^[5]。四维血流 (4D-Flow) MRI 技术三维定义血流方向, 结合容积扫描, 可进行大范围 ROI 的血流量分析、复杂血流的三维可视化和高级血流动力学参数计算^[6], 理论上可真实再现 TOF 矫正术后肺动脉瓣关闭不全的流体力学特征。因此, 本研究拟探究 4D-Flow 技术评估 TOF 矫正术后肺动脉反流的可重复性, 以及与 2D-Flow 技术、超声心动图的一致性。

资料与方法

一、研究对象

前瞻性连续纳入 2018 年 5 月至 8 月于我院接

受 MR 检查的 TOF 矫正术后患者 21 例, 同时进行 2D-Flow 及 4D-Flow 序列扫描。其中男 12 例、女 9 例, 年龄 9~29 岁, 平均 (16±6) 岁。本研究获得我院伦理委员会审批 (批准文号: 2017-1028), 所有患者 MRI 检查前由本人或监护人签署知情同意书。

二、图像采集

采用 3.0 T MR 扫描仪 (通用电气医疗集团, 美国, Discovery MR750), 最大梯度场强 50 mT/m, 最大梯度切换率 200 mT·m⁻¹·ms⁻¹。采用 8 通道表面相控阵心脏专用线圈接收信号。患者仰卧位, 从左前胸引出四根电极导线连接心电门控。4D-Flow 扫描容积取斜矢状位覆盖整个胸主动脉。基于三维傅里叶变换的快速损毁梯度回波, 在 3 个方向上进行流速编码, 获得每个三维体素具有 3 个方向的流动分量。回顾性心电门控使心脏运动状态和数据采集同步, 运用 K 空间的分段技术获得高时间分辨率的电影数据 (时间分辨率 34 ms), 采用 4 次数据平均来抑制呼吸运动伪影。采用 k-t 自适应笛卡尔采样自动校正重建 (k-adaptive-t autocalibrating reconstruction for cartesian sampling, kat-ARC) 加速技术大大缩短扫描时间。2D-Flow 序列屏气采集, 通过右心室流出道电影定位肺动脉瓣层面, 垂直于肺动脉长轴获得肺动脉瓣短轴的相位对比图像。

获得的图像若出现混叠效应伪影,则选取更高的速度编码重新采集图像。2D-Flow 及 4D-Flow 扫描参数如表 1 所示。

所有患者于 1 周内行常规二维和多普勒超声心动图检查,取胸骨旁短轴或肋骨下视野,同时显示近端血流汇聚、远端射流及窄颈,通过彩色多普勒于舒张末期肺动脉瓣下半定量评估肺动脉瓣反流程度(少量、中量、大量),包括反流束的宽度、面积、长度^[3]。

三、图像分析

2D-Flow 与 4D-Flow 图像均采用专用心脏 MR 图像后处理软件 Circle CVI42 v. 5.9.0 (Circle Cardiovascular Imaging, 加拿大)分析,由两名具有 3 年以上心脏 MR 后处理经验的医师进行图像后处理。图像后处理前统一编号去除患者临床信息,且在对另外两种图像测量结果不知情的情况下处理图像。其中 1 名医师于至少 1 个月后再次后处理 MR 图像,获得肺动脉瓣血流参数。

2D-Flow 图像导入工作站 Flow 模块后,同时结合相位图及幅值图手动勾画 ROI,再勾画无血流区域进行背景矫正,记录前向血流量、反向血流量及反流分数。4D-Flow 后处理过程包括以下步骤:(1)预处理:选择要分析的 ROI,手动调节蒙版,勾选并进行偏差矫正、相位去卷褶处理以及背景矫正;(2)分割:分割出右心室流出道至肺动脉左右分支部分用于分析;(3)分析:观察 ROI 迹线图等多种可视化电影图像及原始解剖图像,选择肺动脉瓣层面获得相关血流数据。心功能参数测量:心室短轴电影图像上确定最佳的舒张末及收缩末期图像,软件自动描记结合人工调整确定心内膜与心外膜边界。左心室最基底层面为包含左心室流出道,但左心室心肌包绕>75%,右心室最基底层面为出现肺动脉瓣层面。用 Simpson 法分别计算心室的功能参数[其中部分参数通过体表面积(BSA)进行标准化换算],包括右心室射血分数(RVEF)、右心室心指数(RVCI)、右心室舒张末期容量指数(RVEDVi)、右心室收缩末期容量指数(RVESVi)、右心室心肌

量指数、左心室射血分数(LVEF)、左心室心指数(LVCI)、左心室舒张末期容量指数(LVEDVi)、左心室收缩末期容量指数(LVESVi)、左心室心肌质量指数。

根据 2017 年美国超声心动图协会推荐^[3],以 20%、40% 为标准将 MR 测量的反流分数转换为少量、中量、大量的半定量结果,并与超声比较。

四、统计学分析

采用 SPSS 23.0 统计软件。2D-Flow 与 4D-Flow 测得的前向血流量、反向血流量、反流分数为连续变量,采用组内相关系数(interclass correlation coefficients, ICC)及 Bland-Altman 分别分析 2D-Flow 和 4D-Flow 的可重复性。分别求出 2D-Flow 和 4D-Flow 不同阅片者对同一患者测量结果的平均值,采用 ICC 及 Bland-Altman 分析 2D-Flow 与 4D-Flow 结果的一致性。超声心动图测量的反流程度结果为有序分类变量,2D-Flow、4D-Flow 与其一致性检验采用加权 Kappa 系数分析。采用 Pearson 相关分析反流分数与心功能参数的相关性。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

21 例患者均成功完成 MR 检查并获得具有诊断意义的图像。图 1~6 示其中 1 例患者 2D-Flow 与 4D-Flow 血流测量结果。

一、4D-Flow 观察者间和观察者内测量一致性

同一医师通过 4D-Flow 多次测量同一患者肺动脉前向血流量、反向血流量、反流分数均具有良好的-一致性,ICC 值分别为 0.996、0.997、0.985, P 值均 <0.001 ;不同医师测量同一患者肺动脉前向血流量、反向血流量、反流分数的 ICC 值分别为 0.993、0.994、0.968, P 值均 <0.001 。观察者间和观察者内测量一致性的 Bland-Altman 分析如图 7~12 所示。

二、2D-Flow 观察者间和观察者内测量一致性

同一医师通过 2D-Flow 多次测量同一患者肺动脉前向血流量、反向血流量、反流分数,ICC

表 1 2D-Flow 及 4D-Flow 扫描参数

测量指标	TR (ms)	TE (ms)	反转角	重建矩阵	频率编码方向上的视野(cm)	相位编码方向上的视野(cm)	每段 K 空间线数	时间分辨率 (ms)	速度编码 (cm/s)	加速因子	层厚 (mm)	激励次数	扫描时间 (min) ^a
2D-Flow	4.3	2.6	20°	140×128	36	0.9	4	34	100~250	2	8.0	1	5.00
4D-Flow	4.3	2.1	10°	180×180	35	0.8	2	34	100~250	kat-ARC 加速	2.4	4	6.65

注:2D-Flow:二维血流;4D-Flow:四维血流;^a:心率为 70 次/min 时的扫描时间;kat-ARC 加速;k-t 自适应笛卡尔采样自动校正重建加速技术

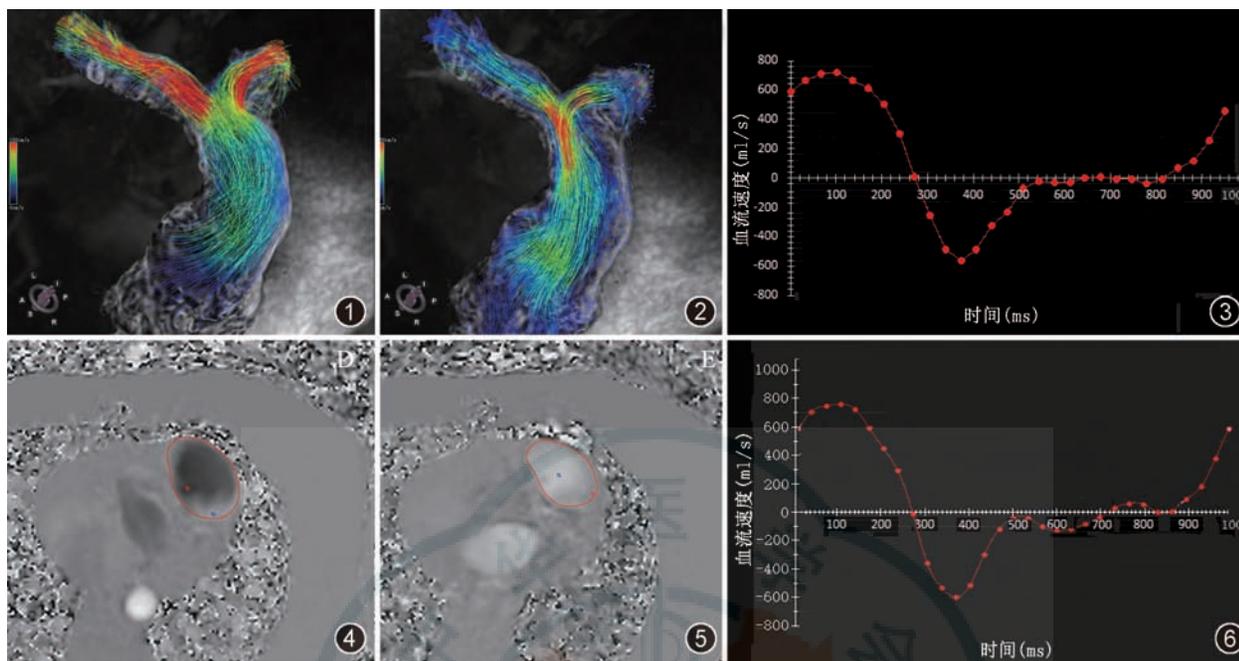


图1~6 男,18岁,法洛三联症矫正术后。图1~3为该患者肺动脉及其分支4D-Flow血流示意图,图1示收缩期肺动脉前向血流,图2示舒张期反流的血流,图3为4D-Flow测得的血流量随时间的变化曲线图。图4~6为该患者肺动脉2D-Flow血流示意图,图4为前向血流,图5为反向血流,图6为2D-Flow测得的血流量随时间的变化曲线图,曲线与横轴围成的面积相当于周期内血流体积的大小,横轴以上代表前向血流,横轴以下代表反向血流

值分别为0.995、0.991、0.959, P 值均 <0.001 ,一致性较好;不同医师测量同一患者肺动脉前向血流量、反向血流量、反流分数的ICC值分别为0.988、0.983、0.923, P 值均 <0.001 。

三、2D-Flow与4D-Flow的结果比较

2D-Flow所测得的前向血流量、反向血流量及反流分数的平均值分别为 (107.015 ± 34.972) ml/周期、 (47.512 ± 25.310) ml/周期、 $42.07\% \pm 11.93\%$;4D-Flow测得的各项参数平均值分别为 (101.413 ± 35.452) ml/周期、 (36.777 ± 20.164) ml/周期、 $34.67\% \pm 9.47\%$ 。2D-Flow与4D-Flow测量的前向血流量、反向血流量及反流分数的ICC值分别为0.954、0.913、0.721, P 值均 <0.001 。各项结果的Bland-Altman分析如图13~15所示,前向血流平均差值为5.603 ml/周期(95%CI: $-0.784 \sim 11.989$ ml/周期),反向血流平均差值为10.735 ml/周期(95%CI: $6.799 \sim 14.671$ ml/周期),反流分数平均差值为7.40% (95%CI: $3.52\% \sim 11.27\%$)。

四、MR与超声心动图的结果比较

超声心动图测量结果示肺动脉大量反流12例,中量反流9例。将2D-Flow与4D-Flow所测得的患者肺动脉反流分数转换为半定量结果,转换后2D-Flow测得的结果示大量反流11例,中量反流10例;转换后4D-Flow结果示大量反流9例,中量反流

12例。将2D-Flow与4D-Flow结果分别与超声检查结果比较,均具有良好的一致性,加权Kappa系数分别为0.897($P < 0.001$)、0.710($P = 0.001$)。

五、反流程度与心功能的关系

各项心功能参数结果如下:RVEF、RVCI、RVEDVi、RVESVi、右心室心肌质量指数、LVEF、LVCI、LVEDVi、LVESVi、左心室心肌质量指数分别为 $47.31\% \pm 7.75\%$ 、 (5.305 ± 1.143) L·min⁻¹·m⁻²、 (146.243 ± 37.022) ml·m⁻²、 (76.183 ± 25.035) ml·m⁻²、 (16.403 ± 9.895) g·m⁻²、 $59.59\% \pm 6.87\%$ 、 (3.697 ± 0.623) L·min⁻¹·m⁻²、 (80.022 ± 12.899) ml·m⁻²、 (32.693 ± 9.363) ml·m⁻²、 (41.302 ± 8.363) g·m⁻²。2D-Flow所测得反流分数与心功能参数的分析结果示RVCI、RVEDVi、RVESVi、LVEDVi、LVESVi均与反流分数存在较强的正相关关系,Pearson相关系数分别为0.600、0.788、0.683、0.578、0.687, P 值均 <0.05 。4D-Flow所测得反流分数与RVCI、RVEDVi、RVESVi、LVEDVi、左心室质量指数均存在较强的正相关关系,Pearson相关系数分别为0.606、0.685、0.534、0.459、0.633, P 值均 <0.05 。

讨 论

TOF矫正术后患者早期常常可以耐受肺动脉

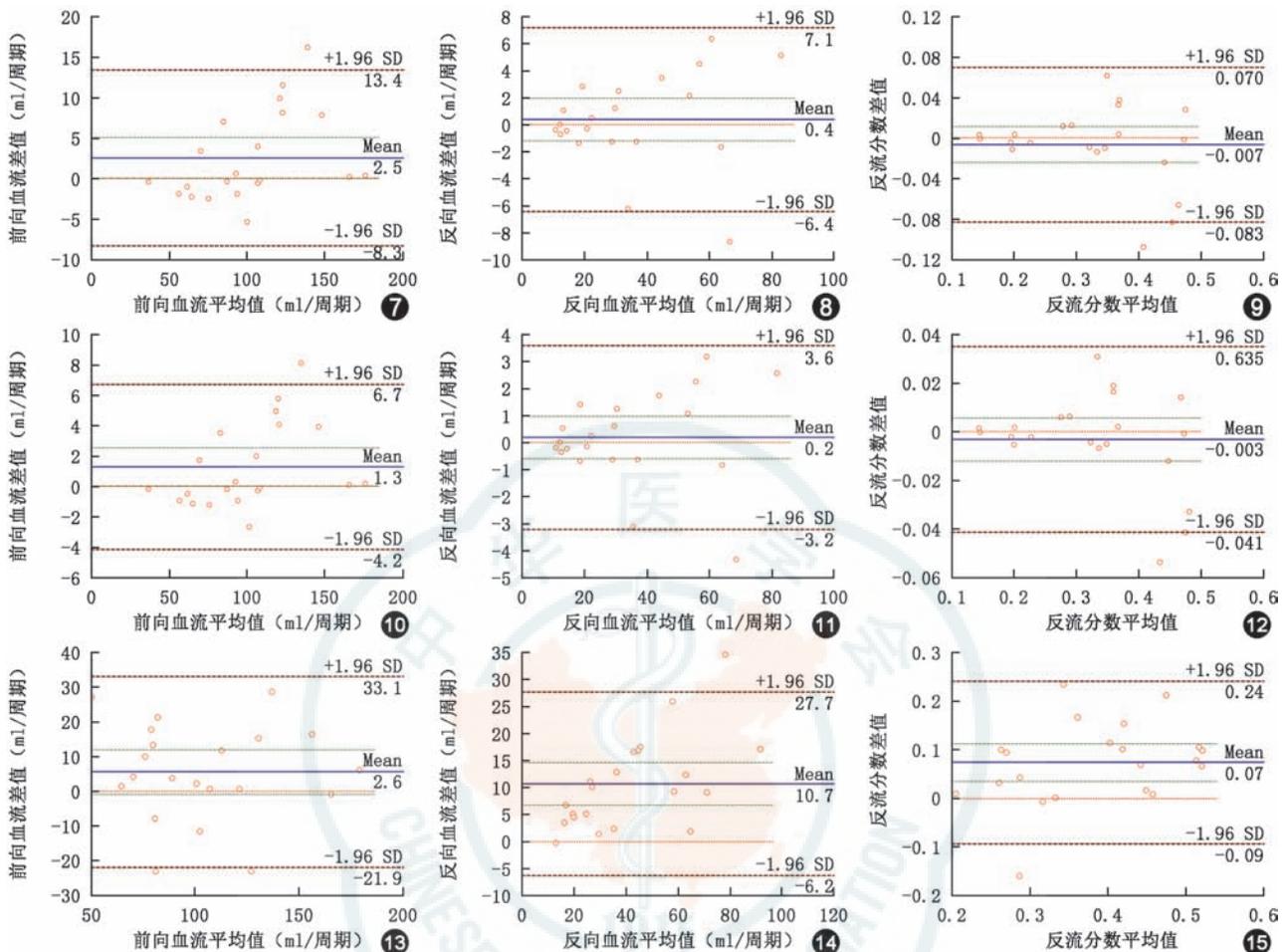


图7~12 4D-Flow肺动脉血流测量结果的Bland-Altman分析。图7~9示前向血流、反向血流、反流分数测量者间的一致性,测量者间差值的均值及上下限均在可接受的范围内,一致性良好。图10~12示前向血流、反向血流、反流分数测量者内的一致性,测量者内差值的均值及上下限均在可接受的范围内,一致性良好。图13~15 2D-Flow与4D-Flow肺动脉血流测量结果的Bland-Altman分析。前向血流、反向血流、反流分数2D-Flow与4D-Flow间的一致性,两者间差值的均值及上下限均在可接受的范围内,一致性良好

反流及慢性容量负荷过重而无明显症状,但长期可导致右心功能下降、运动耐量减低、心律失常甚至心源性猝死等严重后果^[7-8]。本研究通过4D-Flow成像再现了TOF术后患者肺动脉血流形态学及动力学特征,并比较了与常规2D-Flow技术及超声的一致性。通过本研究结果,提示4D-Flow技术具有良好的可重复性,4D-Flow定量测定的肺动脉瓣血流量及反流分数与2D-Flow一致性较好,反流程度结果与超声高度一致。

4D-Flow成像可定量分析扫描容积内任意层面血流,一次成像即可获取心脏大血管任意感兴趣区血流及解剖学数据。本研究中不同后处理医师及同一医师多次测量肺动脉瓣血流参数具有良好的一致性。而2D-Flow操作者依耐性强,需要分别精确定位各个感兴趣区;超声则无法定量评估肺动脉反流,且肺动脉瓣过于接近探头及术后钢丝,很难

对肺动脉瓣血流进行准确评估^[3]。

4D-Flow成像通过三维编码使TOF矫正术后患者这样的复杂血流可视化,同时获得高级血流动力学参数,如流速、流量、动能、壁剪切力等,与2D-Flow技术及超声检查相比,能够更直观地显示TOF矫正术后肺动脉的复杂血流。4D-Flow图像通过工作站后处理后,多种三维电影图像(包括速度视图、向量视图、迹线视图、流线视图、壁剪切力视图、压力视图及能量视图)可以展示TOF矫正术后患者肺动脉血流动力学改变的全貌,为一站式综合评估肺动脉血流提供可能。

肺动脉瓣反流分数与心功能参数的相关性结果表明反流越严重, RVCI、RVEDVi、RVESVi、LVEDVi越大,提示心室容量负荷加重。以往的研究也有类似的结果报道。刘辉等^[9]通过传统2D-Flow探究TOF术后患者肺动脉反流与右心室功

能的关系的研究中,提示肺动脉反流与RVEDVi、RVESVi均呈正相关,而与RVEF、RVSV无显著相关。Carlsson等^[10]报道健康志愿者左右心室的平均能量与EDV、ESV、SV呈正相关。Fredriksson等^[11]研究结果表明TOF矫正术后患者RVEDVi与右心室湍流能量呈正相关。因此,肺动脉反流与心室容量负荷相关,进一步将可导致心室扩大与心功能不全。

4D-Flow技术的临床应用仍有待该技术的提高。时间及空间分辨率的局限性可能低估血流动力学参数,更高的时间及空间分辨率则需要较长的采集时间,且4D-Flow与心脏MR常规序列相比采集时间较长。在本研究中4D-Flow的采集时间略长于2D-Flow,但4D-Flow能提供更全面的血流动力学信息。研究表明压缩感知等欠采样技术以及快速采集技术的应用可大大减少4D-Flow采集时间^[12-14],以满足临床工作需求。

本研究的局限性:(1)患者样本量有限;(2)本研究未探究TOF矫正术后患者流速、动能、壁剪切力等其他高级血流动力学参数的特征。

综上所述,4D-Flow MRI技术能够再现TOF术后患者肺动脉血流形态学及动力学特征,并具有良好的可重复性,与传统2D-Flow及超声心动图具有一定的一致性,且能对TOF术后心腔结构与功能改变导致的复杂血流进行评估,当然,相关结果的准确性仍需要进一步多中心、大样本验证。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Apitz C, Webb GD, Redington AN. Tetralogy of Fallot[J]. *Lancet*, 2009, 374(9699): 1462-1471. DOI: 10.1016/S0140-6736(09)60657-7.
- [2] Bouzas B, Kilner PJ, Gatzoulis MA. Pulmonary regurgitation: not a benign lesion[J]. *Eur Heart J*, 2005,26(5):433-439. DOI: 10.1093/eurheartj/ehi091.
- [3] Zoghbi WA, Adams D, Bonow RO, et al. Recommendations for noninvasive evaluation of native valvular regurgitation: a report from the American Society of Echocardiography Developed in collaboration with the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2017,30(4): 303-371. DOI: 10.1016/j.echo.2017.01.007.
- [4] Nayak KS, Nielsen JF, Bernstein MA, et al. Cardiovascular magnetic resonance phase contrast imaging[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2015,17:71. DOI: 10.1186/s12968-015-0172-7.
- [5] 胥巧丽,张健康,刘亚,等. 相位对比磁共振成像技术的原理及应用[J]. *生物医学工程研究*,2017,36(4):387-391. DOI: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2017.04.23.
- [6] Crandon S, Elbaz M, Westenberg J, et al. Clinical applications of intra-cardiac four-dimensional flow cardiovascular magnetic resonance: a systematic review[J]. *Int J Cardiol*, 2017, 249: 486-493. DOI: 10.1016/j.ijcard.2017.07.023.
- [7] Murphy JG, Gersh BJ, Mair DD, et al. Long-term outcome in patients undergoing surgical repair of tetralogy of Fallot[J]. *N Engl J Med*, 1993, 329(9): 593-599. DOI: 10.1056/NEJM199308263290901.
- [8] Gatzoulis MA, Balaji S, Webber SA, et al. Risk factors for arrhythmia and sudden cardiac death late after repair of tetralogy of Fallot: a multicentre study[J]. *Lancet*, 2000, 356 (9234):975-981. DOI: 10.1016/S0140-6736(00)02714-8.
- [9] 刘辉,王秋实,梁长虹,等. 3.0 T MR相位对比法评价法洛四联症根治术后肺动脉反流与右心室容量及收缩功能关系[J]. *中国医学影像技术*,2012,28(11):1982-1986.
- [10] Carlsson M, Heiberg E, Toger J, et al. Quantification of left and right ventricular kinetic energy using four-dimensional intracardiac magnetic resonance imaging flow measurements [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2012,302(4):H893-900. DOI: 10.1152/ajpheart.00942.2011.
- [11] Fredriksson A, Trzebiatowska-Krzynska A, Dyverfeldt P, et al. Turbulent kinetic energy in the right ventricle: potential MR marker for risk stratification of adults with repaired Tetralogy of Fallot[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018,47(4): 1043-1053. DOI: 10.1002/jmri.25830.
- [12] Ma LE, Markl M, Chow K, et al. Aortic 4D flow MRI in 2 minutes using compressed sensing, respiratory controlled adaptive k-space reordering, and inline reconstruction. *Magn Reson Med*, 2019,81(6):3675-3690. DOI: 10.1002/mrm.27684.
- [13] Rich A, Potter LC, Jin N, et al. A Bayesian approach for 4D flow imaging of aortic valve in a single breath-hold[J]. *Magn Reson Med*, 2019,81(2):811-824. DOI: 10.1002/mrm.27386.
- [14] Bollache E, Barker AJ, Dolan RS, et al. k-t accelerated aortic 4D flow MRI in under two minutes: feasibility and impact of resolution, k-space sampling patterns, and respiratory navigator gating on hemodynamic measurements[J]. *Magn Reson Med*, 2018,79(1):195-207. DOI: 10.1002/mrm.26661.

(收稿日期:2018-11-17)

(本文编辑:高鑫 张琳琳)