

探讨单次屏气压缩感知实时电影成像在磁共振心室功能及应变评估中的可行性*

邓巧^{1,2}, 唐露², 伍希¹, 吴韬², 何帅², 李磊²,
程巍², 刁乙珂², 刁凯悦², 岳文军¹, 陈玉成³, 孙家瑜^{2△}

1. 川北医学院附属医院 放射科(南充 637000); 2. 四川大学华西医院 放射科(成都 610041); 3. 四川大学华西医院 心内科(成都 610041)

【摘要】目的 探讨磁共振单次屏气压缩感知实时电影成像(single-breath-hold compressed sensing real-time cine imaging, CS-cine)在心室功能及应变评估中的可行性。**方法** 前瞻性连续纳入70例受检者,所有患者均行心脏磁共振标准稳态自由进动电影成像(standard steady-state free precession cine imaging, sta-cine)和CS-cine。电影序列扫描方位:从心底到心尖连续短轴位及左室两腔、三腔、四腔长轴位,同一受检者的两组电影图像扫描范围、层数、层厚、层间距等一致。对所有电影图像进行主观图像质量评价,并通过后处理软件分析得出左、右常规心室功能参数和左室应变参数。比较两组电影图像质量、常规心室功能参数及左室应变参数之间的差异。通过计算组内相关系数(ICC)验证CS-cine心室定量参数的重复性,采用Bland-Altman分析两组电影间心室定量参数的一致性。**结果** sta-cine组、CS-cine组电影的中位采集时间分别为272 s和21 s。sta-cine组、CS-cine组电影图像质量评分中位数分别为4分和2分,差异有统计学意义($P<0.001$)。两组电影间常规心室功能参数比较:CS-cine所获得的射血分数(ejection fraction, EF)、舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV)、搏出量(stroke volume, SV)均显著降低($P<0.001$),而左、右室收缩末期容积(end-systolic volume, ESV)及左室心肌质量(left ventricular mass, LVmass)差异无统计学意义($P>0.05$)。两组电影间应变参数比较:左室中部径向应变峰值(peak radial strain, PRS)、周向应变峰值(peak circumferential strain, PCS)及纵向应变峰值(peak longitudinal strain, PLS)差异均有统计学意义($P<0.001$)。CS-cine各功能定量参数都具有较好的重复性($ICC=0.88\sim0.99$),Bland-Altman分析结果显示各参数测量中,右室容积功能及左室PCS、PLS测量有95%以上在一致性范围内,其余参数测量结果均有91%以上在一致性界值内,可认为两组电影测量结果一致性较好。**结论** CS-cine能够快速获取图像进行心功能定量分析,其分析所得常规心室功能参数及左室整体应变参数有较好的重复性。

【关键词】 压缩感知 心脏磁共振 单次屏气 实时成像 心功能 左室应变

Feasibility of Single-Breath-Hold Compressed Sensing Real-Time Cine Imaging for Assessment of Ventricular Function and Left Ventricular Strain in Cardiac Magnetic Resonance DENG Qiao^{1,2}, TANG Lu², WU Xi¹, WU Tao², HE Shuai², LI Lei², CHENG Wei², DIAO Yi-ke², DIAO Kai-yue², YUE Wen-jun¹, CHEN Yu-cheng³, SUN Jia-yu^{2△}.

1. Department of Radiology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China; 2. Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China; 3. Department of Cardiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

△ Corresponding author, E-mail: sunjiayu@wchscu.cn

【Abstract】 Objective To explore the feasibility of single-breath-hold compressed sensing real-time cine imaging (CS-cine) in the assessment of ventricular function and left ventricular (LV) strain. **Methods** A total of 70 subjects were enrolled prospectively, and all subjects underwent cardiac magnetic resonance imaging (cardiac MRI) using both the standard steady-state free precession cine (sta-cine) acquisition and a prototype CS-cine sequence. For both CS-cine and sta-cine imaging, continuous short-axis cine images were acquired from the base to the apex to cover the entire left ventricle, and long-axis cine images including two-, three-, and four-chamber views were also acquired. The scanning range, number of slices, slice thickness and intervals were kept identical for the two cine images of the same participant. Subjective evaluation of the image quality was performed on all cine images. For both sequences, the conventional function parameters of the left and the right ventricles and LV strain values were assessed with post-processing software analysis. The cine image quality, conventional ventricular function parameters, and LV strain values were compared between the two cine groups and the differences were examined. Inter- and intraobserver agreements for CS-cine images were measured using intraclass correlation coefficient (ICC). Bland-Altman analysis was performed to assess reproducibility between the two cine methods. **Results** The median scanning time of CS-cine was 21 s versus 272 s for sta-cine ($P<0.001$). The median image quality scores of two groups were significantly different, 4 points for sta-cine and 2 points for CS-cine ($P<0.001$). Bi-ventricular end-diastolic volumes (EDV), stroke volume (SV) and ejection fraction (EF)

* 四川省科技厅重点研发项目(No. 2020YFS0123)资助

△ 通信作者, E-mail: sunjiayu@wchscu.cn

were significantly smaller in CS-cine ($P<0.001$). Nevertheless, no significant differences between the two groups in bi-ventricular ESV or LV mass were observed ($P>0.05$). LV strain parameters, including the peak radial strain, peak circumferential strain and peak longitudinal strain derived from LV mid-ventricular slice, were significantly different in the two sequences ($P<0.001$). Moreover, CS-cine-derived functional parameters and strain measurements have a good correlation with those of sta-cine (for RV function parameters, and left ventricular PLS, PCS values, more than 95% points fell within the limits of agreement [LoA]; meanwhile, more than 91% points fell within the LoA for other parameters) and inter- and intraobserver agreements were strong ($ICC=0.88$ to 0.99) for CS-cine. **Conclusion** CS-cine can well realize the rapid acquisition of cine images for quantitative analysis of cardiac function, and the conventional ventricular function parameters and LV globalized strain values obtained from CS-cine imaging have good reproducibility.

【Key words】 Compressed sensing Cardiac MRI Single-breath-hold Realtime imaging
Cardiac function Left ventricular strain

心功能是临床心力衰竭诊断及预后管理的重要评价指标^[1-3]。磁共振心功能成像采用平衡稳态自由进动(balanced steady-state free precession, bSSFP)电影成像,结合回顾性心电门控段采集、屏气扫描,其图像质量好,信噪比高,心肌血池对比度好,是目前公认的无创心功能评估的金标准^[4]。该方法不仅可用于左、右心室容积和功能测量,还能进行心肌应变评估。然而,心功能测量要求覆盖全心室的连续短轴扫描,由于其扫描层数多,因此患者所需屏气次数也相对较多,整体扫描时间较长。需要患者充分配合才能获得较好的图像质量,以用于准确测量心功能。随着磁共振技术的发展,各种加速技术不断被尝试用于电影成像,近来,压缩感知(compressed sensing, CS)技术被广泛应用于全身不同部位的磁共振快速成像^[5],其成像克服了传统电影Nyquist采样的限制,利用变换域中图像的稀疏性进行随机K-空间采样、非线性迭代重建^[6-7],大幅降低了图像采集时间,使快速磁共振电影成像成为可能。虽然目前已有研究基于单次屏气压缩感知实时电影成像(single-breath-hold compressed sensing real-time cine imaging, CS-cine)评估心室常规功能和心肌应变,但其结果仍然存在争议,且其中部分研究样本量相对较小,还需进一步探索^[8-9]。因此,本研究比较了CS-cine与传统标准稳态自由进动电影成像(standard steady-state free precession cine imaging, sta-cine)之间的图像质量、常规心室功能参数及左室应变参数,探讨CS-cine在心功能评估和应变分析中的可行性。

1 材料及方法

1.1 研究对象

连续性纳入2020年11月–2021年4月于四川大学华西医院放射科行心脏磁共振(cardiac magnetic resonance imaging, cardiac MRI)检查的受检者共70例。所有受检者均完成常规sta-cine及CS-cine检查。排除标准:①非磁共振兼容金属置入患者;②严重幽闭恐惧症患者;③患者屏

气配合较差、心律不齐、伪影等原因造成图像质量差,无法满足图像后处理分析的受检者。本研究经我院医学伦理委员会批准(批准号:2016335),所有受检者均签署知情同意书。

1.2 数据采集

采用西门子3.0T磁共振扫描仪(Magnetom Skyra 3.0T Siemens Medical Solutions, Germany),18通道体部相控阵线圈。常规序列采集参考心脏磁共振标准扫描协议^[10]。检查前对所有患者进行呼气末屏气训练。sta-cine采用真实稳态自由进动快速成像(true fast imaging with steady-state precession, TrueFISP),回顾性心电门控,呼气末屏气扫描,一次屏气采集一层电影图像;CS-cine成像采用前瞻性自适应门控技术,单次激发(shots per slices, 1)、实时采集(real-time),呼气末屏气扫描,一次屏气采集整个心室范围短轴电影图像。两组电影扫描范围、层数、层间距一致。扫描方位:从心底到心尖的连续短轴位及两腔、三腔、四腔长轴位。具体扫描参数见表1。

表 1 扫描参数
Table 1 Imaging parameters

Parameter	sta-cine	CS-cine
ECG-gating	Retrospective	Adaptive-prospective
TE/ms	1.43	1.23
Repetition time/ms	3.3	2.9
FOV	320 mm×340 mm	320 mm×340 mm
Voxel size	1.6 mm×1.6 mm× 8.0 mm	1.6 mm×1.6 mm× 8.0 mm
Temporal resolution/ms	31.7-56.2	41.5-57.1
Slice thickness/mm	8-11	8-11
Flip angle degrees	50	50
Sequences defination	Segments	Single shot
Band width/(Hz/Px)	962	962
Calculated phases	25	25

ECG: electrocardiography; TE: Echo time; FOV: Field of view.

1.3 图像质量评分

一位具有五年以上心脏磁共振图像诊断经验的放射科医师对两组电影图像进行盲法视觉评估,对图像质量

进行打分。评分依据: 心肌内外膜轮廓十分清晰, 瓣膜显示非常清楚, 短轴位及长轴位图像上均无任何伪影出现记为5分; 短轴或长轴任一方位图像中存在伪影(呼吸运动伪影、磁化率伪影、心电识别错误产生的伪影、卷褶伪影、混叠伪影)扣除1分; 短轴图像中伪影累计层数 ≥ 3 层且 < 5 层扣除1分; 短轴图像中伪影累计层数 ≥ 5 层且 < 8 层扣除1分; 短轴图像中伪影累计层数 ≥ 8 层扣除1分; 图像中存在两种及以上种类伪影扣除1分。最终评分为0分(短轴及长轴都存在伪影, 且短轴伪影累计 ≥ 8 层)的图像不进行心功能定量分析, 对图像质量评分为1~5分的图像进行心功能定量后处理。在图像质量评分过程当中, 如果对图像质量评价存在疑虑, 无法明确具体评分的情况下, 则由另一名同等资历医师共同做出评分。

1.4 图像后处理分析

1.4.1 常规心室功能分析 使用专用后处理软件Medis Suite QMass 8.1。将图像导入后处理工作站, 勾画舒张末期、收缩末期左室心肌内、外膜轮廓及右室心内膜轮廓, 乳头肌和肌小梁包括在心腔容积内。左室舒张末期基底层面定义为左室心肌出现至少约50%的层面, 右室舒张末期基底层面定义为肺动脉瓣下一层面, 如果流出道部分心肌壁较薄, 无肌小梁则提示心房可能, 心尖定义为肉眼可见心腔的最后一个层面; 收缩期根据实际心脏舒缩情况可比舒张期少1至2层^[11]。根据辛普森原理软件自动计算得出左、右心室舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV)及收缩末期容积(end-systolic volume, ESV)、射血分数(ejection fraction, EF)、搏出量(stroke volume, SV)及左室心肌质量(left ventricular mass, LVmass)。

1.4.2 左室应变分析 应变分析使用基于变形配准(deformable registration algorithm, DRA)原型的应变分析软件(TruFi Strain Demonstrator Version 2.0, Siemens)。该软件基于像素与像素间追踪心肌在整个心动周期中的位移, 其分析结果的稳健性已被证实^[12]。软件自动识别舒张末期心肌内、外膜轮廓, 必要的情况下手动校正轮廓以确保乳头肌和心外膜脂肪排除在外, 在像素级运动配准计算后, 软件自动从舒张末期像素到像素间(pixel by pixel)扩增至其余所有期相, 并计算得出应变参数^[13-14]。径向应变峰值(peak radial strain, PRS)及周向应变峰值(peak circumferential strain, PCS)在短轴位图像上获得, 纵向应变峰值(peak longitudinal strain, PLS)在四腔长轴位图像上获取。

1.5 重复性分析

图像后处理由2位具有3年以上图像后处理经验的技师完成, 隐去图像中所有相关检查信息。随机抽取1位操

作者对所有电影图像进行后处理分析。在间隔1个月左右, 该操作者对20例随机抽取的CS-cine图像进行组内重复性验证; 另一名操作者对以上20例CS-cine图像进行组间重复性验证。

1.6 统计学方法

应用SPSS23及MedCalc16.0进行统计学分析。先对每组数据进行正态性检验, 正态型数值变量用 $\bar{x} \pm s$ 描述; 非正态型数值变量用中位数和四分位间距(P_{25} , P_{75})描述; 根据数据分布类型, 两组电影之间图像质量评分、EDV、ESV、SV、LVmass、PRS、PCS及PLS用配对样本 t 检验或Wilcoxon符号秩和检验进行比较; 通过计算组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)来验证组间及组内重复性, ICC系数 ≥ 0.81 为一致性极好, $0.61 \leq ICC < 0.81$ 为一致性好, $0.41 \leq ICC < 0.61$ 为一致性中等。CS-cine与sta-cine之间的一致性检验用Bland-Altman分析。双侧 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组电影图像质量比较

本研究共纳入70例受检者, 其中女性34例, 男性36例, 平均年龄(43.73 ± 15.85)岁。sta-cine图像质量评分的中位数为4分, CS-cine图像质量评分的中位数为2分, 两组评分差异有统计学意义($P < 0.001$)。其中sta-cine组满足心功能定量分析的有63例, 评分为5分的有21例; 而在CS-cine组, 满足心功能定量分析的有64例, 但没有图像质量评分为5分者。如图1, 所有受检者CS-cine图像均存在不同程度的伪影, 但大部分的伪影不影响心肌边界的识别, 伪影累及基底层面较为常见, 心室中部及心尖部伪影

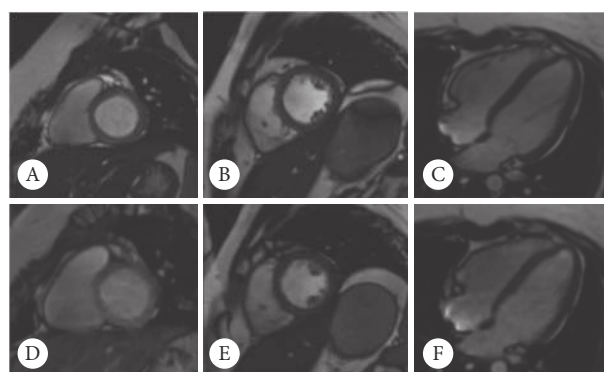


图1 sta-cine及CS-cine电影图像

Fig 1 Images acquired from sta-cine and CS-cine

A: sta-cine end-diastolic basal short-axis slice; B: sta-cine end-diastolic mid-ventricular short-axis slice; C: sta-cine end-diastolic 4-chamber long-axis slices; D: CS-cine end-diastolic basal short-axis slice; E: CS-cine end-diastolic mid-ventricular short-axis slice; F: CS-cine end-diastolic 4-chamber long-axis slices.

相对少;其中伪影累及基底部达3个层面的有41例。在70例受检者中,由于伪影严重,累计评分为0分而无法进行心功能定量比较的共8例,其中1例显示两组电影图像质量均差,累计评分均为0分;4例由于呼吸运动伪影严重而造成sta-cine图像质量差,累计评分为0分排除;3例因混叠、卷褶伪影或磁化率伪影等不同类型伪影共同作用造成CS-cine图像质量差而排除。最终有62例受检者被纳入常规心室功能及左室应变分析。两组电影连续短轴位中位采集时间分别为:sta-cine, 272 s (180 s, 301 s); CS-cine, 21 s (18 s, 25 s), 差异有统计学意义($P < 0.001$)。

2.2 两组间常规心功能参数比较

sta-cine组获得的LVEF、LVEDV、LVSV、RVEF、RVEDV、RVSV均大于CS-cine组($P < 0.05$);而两组间LVESV、RVESV及LVmass差异无统计学意义($P > 0.05$),具体结果见表2。

表 2 两组电影常规心功能参数比较〔中位数(四分位间距)〕

Table 2 Comparison of the bi-ventricular conventional function parameters between two groups (median [P₂₅, P₇₅])

Parameters	sta-cine group (n=62)	CS-cine group (n=62)	P
LVEF/%	61.77 (47.33, 66.27)	58.68 (42.59, 63.99)	<0.001
LVEDV/mL	148.22 (123.01, 182.81)	139.45 (112.29, 181.17)	<0.001
LVESV/mL	56.22 (42.17, 97.85)	55.68 (42.45, 94.89)	0.702
LVSV/mL	80.97 (70.56, 95.83)	72.99 (66.01, 86.14)	<0.001
LVmass/g	86.29 (66.26, 115.25)	85.37 (65.66, 119.30)	0.558
RVEF/%	55.68 (51.08, 61.10)	52.06 (48.04, 58.79)	<0.001
RVEDV/mL	126.92 (103.90, 148.95)	119.55 (100.52, 145.77)	<0.001
RVESV/mL	53.31 (46.58, 66.65)	55.29 (45.36, 68.35)	0.438
RVSV/mL	70.30 (56.11, 83.20)	63.50 (51.07, 77.78)	<0.001

LVEF: Left ventricular ejection fraction; LVEDV: Left ventricular end-diastolic volume; LVESV: Left ventricular end-systolic volume; LVSV: Left ventricular stroke volume; LVmass: Left ventricular mass; RVEF: Right ventricular ejection fraction; RVEDV: Right ventricular end-diastolic volume; RVESV: Right ventricular end-systolic volume; RVSV: Right ventricular stroke volume.

2.3 两组间左室应变参数比较

两组电影图像左室中部应变峰值比较详见表3, sta-cine组的PRS、PCS、PLS绝对值均大于CS-cine组,差异有统计学意义(P 均 < 0.001)。

2.4 常规心功能参数及左室应变参数重复性及一致性检验

详见表4、表5及图2、图3。CS-cine所得常规心功能参数及左室峰值应变参数组间及组内重复性如下:除LVmass(inter-ICC=0.892 1; intra-ICC=0.892 4)和RVSV(inter-ICC=0.880 9; intra-ICC=0.890 8)外,其余定

表 3 两组电影左室应变峰值比较〔中位数(四分位间距)〕

Table 3 Comparison of the LV peak strain values between two groups (median [P₂₅, P₇₅])

Parameters	sta-cine group (n=62)	CS-cine group (n=62)	P
PRS/%	38.54 (28.12, 45.33)	29.61 (19.98, 36.53)	<0.001
PCS/%	-16.42 (-18.57, -12.78)	-12.98 (-14.58, -10.26)	<0.001
PLS/%	-13.76 (-15.67, -11.41)	-9.19 (-10.48, -7.30)	<0.001

PRS: Peak radial strain; PCS: Peak circumferential strain; PLS: Peak longitudinal strain.

量参数ICC均 > 0.90 ; Bland-Altman一致性分析显示:各定量参数的95%一致性界值分别为:LVEF(-2.8, 7.2)、LVEDV(-17.9, 31.2)、LVESV(-15.1, 14.6)、LVSV(-8.5, 22.6)、LVmass(-18.2, 14.8)、RVEF(-4.3, 8.6)、RVEDV(-17.4, 29.6)、RVESV(-10.7, 10.5)、RVSV(-10.6, 22.6)、PCS(-6.1, 0)、PRS(-3.2, 19.9)、PLS(-8.3, -0.5), 分有91.94%(57/62)、91.94%(57/62)、93.55%(58/62)、93.55%(58/62)、91.94%(57/62)、95.16%(59/62)、95.16%(59/62)、96.77%(60/62)、

表 4 CS-cine常规心室功能参数组间及组内ICC (n=62)

Table 4 Intraobserver and interobserver variability of conventional ventricular function parameters for CS-cine (n=62)

Parameters	ICC	
	Interobserver	Intraobserver
LVEF/%	0.973 5	0.972 6
LVEDV/mL	0.987 6	0.986 8
LVESV/mL	0.991 1	0.994 9
LVSV/mL	0.933 9	0.901 4
LVmass/g	0.892 1	0.892 4
RVEF/%	0.901 2	0.900 5
RVEDV/mL	0.981 5	0.954 5
RVESV/mL	0.968 3	0.974 4
RVSV/mL	0.880 9	0.890 8

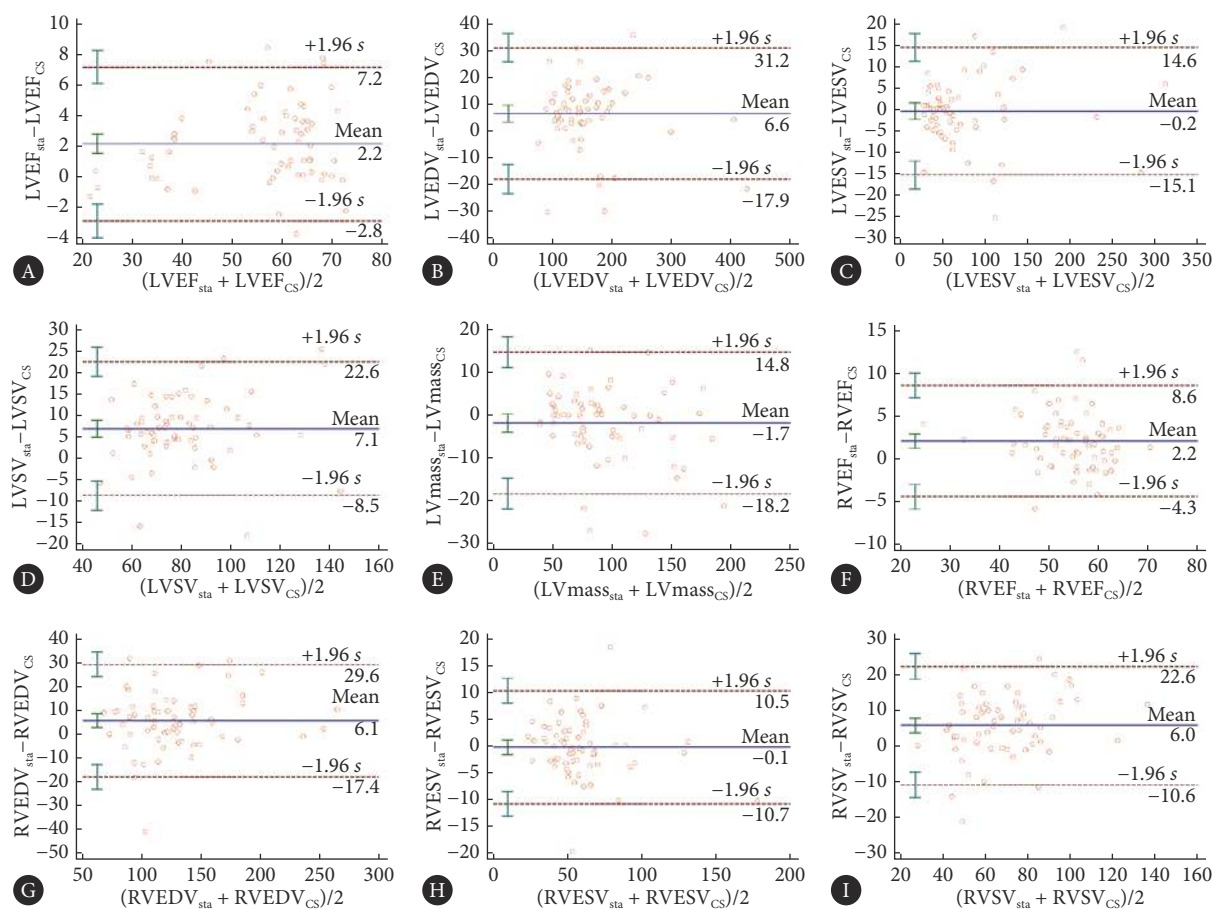
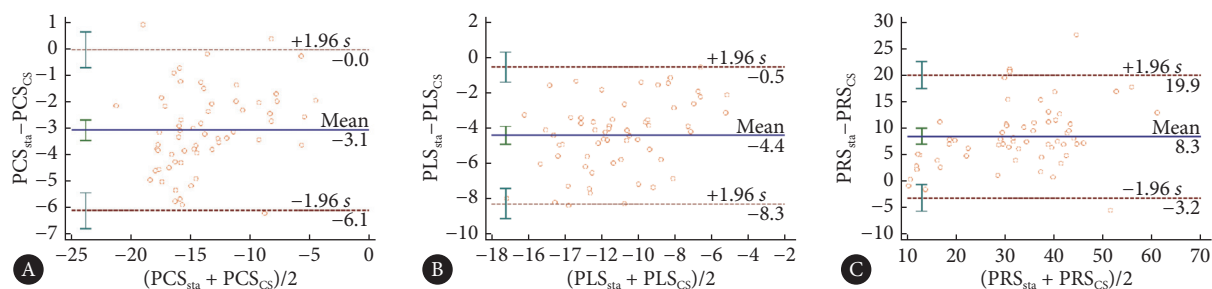
LVEF: Left ventricular ejection fraction; LVEDV: Left ventricular end-diastolic volume; LVESV: Left ventricular end-systolic volume; LVSV: Left ventricular stroke volume; LVmass: Left ventricular mass; RVEF: Right ventricular ejection fraction; RVEDV: Right ventricular end-diastolic volume; RVESV: Right ventricular end-systolic volume; RVSV: Right ventricular stroke volume.

表 5 CS-cine左室应变参数组间及组内ICC (n=62)

Table 5 Intraobserver and interobserver variability of LV stain values for CS-cine (n=62)

Parameters	ICC	
	Interobserver	Intraobserver
PRS/%	0.996 2	0.991 2
PCS/%	0.992 7	0.977 7
PLS/%	0.979 0	0.978 9

PRS: Peak radial strain; PCS: Peak circumferential strain; PLS: Peak longitudinal strain.

图2 CS-cine与sta-cine心室功能参数测量结果的一致性检验 ($n=62$)Fig 2 The consistency of volumetric measurement between CS-cine and sta-cine ($n=62$)图3 CS-cine与sta-cine左室应变参数的一致性检验 ($n=62$)Fig 3 The consistency of LV strain values between CS-cine and sta-cine ($n=62$)

95.16%(59/62)、95.16%(59/62)、93.55%(58/62)、98.39%(61/62)在一致性界值内,提示两组电影测量结果一致性较好。

3 讨论

本研究以sta-cine为标准,从采集时间,图像质量,左、右心室常规心功能参数及左室心肌应变参数这几个方面比较CS-cine与sta-cine之间的差异,从而探讨CS-cine在磁共振心功能及应变评估中的可行性。结果显示:CS-cine可快速获取能够满足心功能定量分析的图像,CS-

cine心室容量参数EDV、SV、EF小于sta-cine,而ESV、LVmass与sta-cine无明显差异;CS-cine组PRS、PCS、PLS同样被低估。尽管如此,CS-cine各心功能定量参数组间、组内重复性好,与sta-cine有较好的一致性。

本研究结果虽然显示sta-cine整体图像质量评分高于CS-cine,但CS-cine还是能获得足够的图像质量进行心功能及应变分析,且CS-cine完成整个心室连续短轴扫描只需21 s左右。该结果与VINCENTI等^[15]研究结果一致。在本研究中,图像质量评估显示:sta-cine不能满足心功能定量的主要影响因素为呼吸运动伪影,而CS-cine中,不能满

足心功能定量分析的主要因素是由混叠伪影、卷褶伪影等共同作用造成的。CS-cine对呼吸运动不敏感,在常规临床实践中,可作为难以耐受多次屏气患者的替代方案。本研究还发现CS-cine图像质量普遍低于sta-cine,这可能与压缩感知成像自身产生的伪影有关,如k-空间欠采样产生的非相干混叠伪影以及CS迭代重建性能相关的图像伪影^[16],CS迭代重建性能与迭代正则化参数设置及迭代重建周期等相关,迭代周期越大,图像质量越好,但重建时间会增加。

在本研究中,CS-cine组的左、右室EDV、SV、EF被低估,而ESV、LVmass与sta-cine组无明显差异,以往部分研究结果同样显示CS-cine分析所得左室容积和功能被轻微低估^[9,17]。心室容积和功能轻微降低与该序列的多次激发、前瞻性门控和实时采集有关。在KIDO等^[8]研究中:心室容积和功能的低估可通过增加每一层采集所需心动周期来解决,即多激发节段采集(multi-shots),KIDO等在3个心动周期内完成一层采集,与标准电影所得心室容积和功能参数相比无显著差异。EDV被低估而ESV无明显差异同样也发生在其他单次屏气加速成像当中,如:real-time SSFP^[18]、kt-BLAST^[19]、TPAT^[20]、TSENSE^[21],前瞻性门控实时触发扫描通常会错过心房收缩过程中心室容积的增加^[22]。在本研究中,虽然两组电影心室容量功能参数差异存在统计学意义,但该差异在临床可接受范围内,如在扩张型心肌病等疾病疗效评估及预后监测中,一般LVEF升高10%以上或恢复到50%以上说明治疗效果有所改善^[23],本研究中的两组电影LVEF中位数差异3.09%,RVEF中位数差异3.62%,差异较小。由此提示,CS-cine可用于同一患者治疗前后心功能的监测及预后随访。

在应变分析中,以往KIDO等^[8]及CHEN等^[9]的研究均应用CS-cine评估左室容积和应变,这两个研究均分析了左室每个层面的应变参数,再计算其平均值,KIDO等^[8]结果显示标准电影与压缩感知电影之间整体周向应变及周向应变率无明显差异,而在后者研究中,标准电影与压缩感知电影之间PLS、PRS、PCS差异均有统计学意义,在本研究中,分析了心室中部层面的应变峰值,其结果与后者研究结果一致。两组电影在应变峰值参数上存在显著差异的原因可能同源于上述心室功能之间的差异,单次屏气实时采集不能采集全完整的心动周期。心肌应变是指在整個心动周期中,心肌相对于原始位置的伸缩程度^[24],特征追踪技术是在电影序列基础上识别并追踪心肌特征,计算整个周期中心肌运动轨迹与原始位置的相对距离^[25],PRS计算为整个心动周期中径向应变最大正值,PCS及PLS计算为整个心动周期中对应方向上应变最负

值,未采到完整的心动周期,心肌相对最大位移减小,周向、径向、纵向峰值应变绝对值相对减小,因此在本研究中,CS-cine获得的PRS、PCS、PLS绝对值均小于sta-cine。

本研究仍然存在一些局限:该研究为单中心研究,可能会造成数据的偏倚;由于受到样本量的限制,该研究未进行不同疾病亚组分析,不能很好的挖掘单次屏气压缩感知在不同心血管疾病中的应用价值,希望在以后的研究中进一步完善。另外,尽管在本研究中尽可能的确保两组电影基本成像参数一致,但两组电影时间分辨率仍然存在差异,其原因是由于在CS-cine中,时间分辨率受到采集方式、患者心率、采集FOV等其他参数的影响。目前,该问题已在多次激发节段采集压缩感知(multi-shots compressed sensing)电影技术中得到了改进,多次激发节段采集压缩感知电影成像可以尽可能的缩小两组电影之间的时间分辨率差距。多次激发节段采集同样需患者多次屏气配合完成检查,其对常规心室功能和应变的测量还需进一步探索。

综上所述:CS-cine能够快速地完成整个心室范围的连续短轴成像,所获得的图像质量能满足常规心室功能定量及左室应变评估。其分析结果与sta-cine一致性好,同时有较好的重复性,可作为屏气配合较差等患者的补充扫描方案或同一患者治疗前后疗效评估。

* * *

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] KALOGEROPOULOS A P, KIM S, RAWAL S, *et al*. Serial changes in left ventricular ejection fraction and outcomes in outpatients with heart failure and preserved ejection fraction. *Am J Cardiol*, 2019, 124(5): 729-735.
- [2] FARMAKIS D, SIMITSIS P, BISTOLA V, *et al*. Acute heart failure with mid-range left ventricular ejection fraction: Clinical profile, in-hospital management, and short-term outcome. *Clin Res Cardiol*, 2017, 106(5): 359-368.
- [3] CURTIS J P, SOKOL S I, WANG Y, *et al*. The association of left ventricular ejection fraction, mortality, and cause of death in stable outpatients with heart failure. *J Am Coll Cardiol*, 2003, 42(4): 736-742.
- [4] ALFAKIH K, REID S, JONES T, *et al*. Assessment of ventricular function and mass by cardiac magnetic resonance imaging. *Eur Radiol*, 2004, 14(10): 1813-1822.
- [5] FENG L, BENKERT T, BLOCK K T, *et al*. Compressed sensing for body MRI. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 45(4): 966-987. <https://doi.org/10.1002/jmri.25547>.
- [6] 张桂山, 肖刚, 戴卓智, 等. 压缩感知技术在MRI上的应用. *磁共振成像*, 2013, 4(4): 314-320.

- [7] LUSTIG M, DONOHO D, PAULY J M, *et al*. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging. *Magn Reson Med*, 2007, 58(6): 1182–1195.
- [8] KIDO T, HIRAI K, OGAWA R, *et al*. Comparison between conventional and compressed sensing cine cardiovascular magnetic resonance for feature tracking global circumferential strain assessment. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2021, 23(1): 10[2022-03-12]. <http://dx.doi.org/10.1186/s12968-021-00708-5>.
- [9] CHEN Y, QIAN W, LIU W, *et al*. Feasibility of single-shot compressed sensing cine imaging for analysis of left ventricular function and strain in cardiac MRI. *Clin Radiol*, 2021, 76(6): 471.e1–471.e7.
- [10] KRAMER C M, BARKHAUSEN J, BUCCIARELLI-DUCCI C, *et al*. E. Standardized cardiovascular magnetic resonance imaging (CMR) protocols: 2020 update. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020, 22(1): 17[2022-03-12]. <http://dx.doi.org/10.1186/s12968-020-00607-1>.
- [11] SCHULZ-MENGER J, BLUEMKE D A, BREMERICH J, *et al*. Standardized image interpretation and post-processing in cardiovascular magnetic resonance—2020 update: Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR): Board of Trustees Task Force on Standardized Post-Processing. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020, 22(1): 19[2022-03-12]. <http://dx.doi.org/10.1186/s12968-020-00610-6>.
- [12] LIU H, YANG D, WAN K, *et al*. Distribution pattern of left-ventricular myocardial strain analyzed by a cine MRI based deformation registration algorithm in healthy Chinese volunteers. *Sci Rep*, 2017, 7: 45314[2022-03-12]. <http://dx.doi.org/10.1038/srep45314>.
- [13] LIN K, MENG L, COLLINS J D, *et al*. Heart deformation analysis: The distribution of regional myocardial motion patterns at left ventricle. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2017, 33(3): 351–359.
- [14] LIN K, COLLINS J D, CHOWDHARY V, *et al*. Heart deformation analysis: Measuring regional myocardial velocity with MR imaging. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2016, 32(7): 1103–1111.
- [15] VINCENTI G, MONNEY P, CHAPTINEL J, *et al*. Compressed sensing single-breath-hold CMR for fast quantification of LV function, volumes, and mass. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(9): 882–892.
- [16] YANG Y, LIU F, JIN Z Y, *et al*. Aliasing artefact suppression in compressed sensing MRI for random phase-encode undersampling. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 2015, 62(9): 2215–2223.
- [17] VERMERSCH M, LONGERE B, COISNE A, *et al*. Compressed sensing real-time cine imaging for assessment of ventricular function, volumes and mass in clinical practice. *Eur Radiol*, 2020, 30(1): 609–619.
- [18] NARAYAN G, NAYAK K, PAULY J, *et al*. Single-breathhold, four-dimensional, quantitative assessment of LV and RV function using triggered, real-time, steady-state free precession MRI in heart failure patients. *J Magn Reson Imaging*, 2005, 22(1): 59–66.
- [19] JAHNKE C, NAGEL E, GEBKER R, *et al*. Four-dimensional single breathhold magnetic resonance imaging using kt-BLAST enables reliable assessment of left- and right-ventricular volumes and mass. *J Magn Reson Imaging*, 2007, 25(4): 737–742.
- [20] EBERLE H C, NASSENSTEIN K, JENSEN C J, *et al*. Rapid MR assessment of left ventricular systolic function after acute myocardial infarction using single breath-hold cine imaging with the temporal parallel acquisition technique (TPAT) and 4D guide-point modelling analysis of left ventricular function. *Eur Radiol*, 2010, 20(1): 73–80.
- [21] YOUNG A A, COWAN B R, SCHOENBERG S O, *et al*. Feasibility of single breath-hold left ventricular function with 3 Tesla TSENSE acquisition and 3D modeling analysis. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2008, 10(1): 24[2022-03-12]. <http://dx.doi.org/10.1186/1532-429X-10-24>.
- [22] ALLEN B D, CARR M, BOTELHO M P, *et al*. Highly accelerated cardiac MRI using iterative SENSE reconstruction: initial clinical experience. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2016, 32(6): 955–963.
- [23] XU Y, LI W, WAN K, *et al*. Myocardial tissue reverse remodeling after guideline-directed medical therapy in idiopathic dilated cardiomyopathy. *Circ Heart Fail*, 2021, 14(1): e007944[2022-03-12]. <http://dx.doi.org/10.1161/CIRCHEARTFAILURE.120.007944>.
- [24] 王未, 张龙江, 祁丽, 等. 心血管磁共振特征追踪技术的临床研究进展. *临床放射学杂志*, 2016, 35(8): 1273–1277.
- [25] HOR K N, BAUMANN R, PEDRIZZETTI, *et al*. Magnetic resonance derived myocardial strain assessment using feature tracking. *J Vis Exp*, 2011 (48): 2356[2022-03-12]. <http://www.jove.com/video/2356/>. doi: 10.3791/2356.

(2021 – 06 – 07收稿, 2022 – 04 – 09修回)

编辑 汤洁