

DOI:10.16781/j.0258-879x.2019.03.0257

• 专题报道 •

两次激发压缩感知技术加速心脏电影采集与诊断效能定量评估

王健¹, 李潇¹, 林路¹, 曹剑¹, 代静文¹, 安靖², 金征宇¹, 王怡宁^{1*}

1. 中国医学科学院、北京协和医学院北京协和医院放射科, 北京 100730

2. 西门子(深圳)医疗系统有限公司, 深圳 518057

[摘要] **目的** 采用两次激发(2-shot)压缩感知(CS)心脏电影成像(cine)技术进行心脏磁共振(CMR)检查,以快速采集能够快速准确评估心功能、更接近标准 cine 序列的高质量图像。**方法** 连续纳入2018年7月至9月于中国医学科学院、北京协和医学院北京协和医院放射科进行CMR检查的患者。所有纳入患者均完成标准 cine 序列、单次激发(ss)CS cine 序列、2-shot CS cine 图像采集。对不同序列采集图像进行图像质量评分和心功能定量分析。**结果** 22例患者完成3种 cine 序列成像。标准 cine 序列、ss CS cine 序列、2-shot CS cine 序列的平均采集时间分别为(102.50±18.55)、(20.50±3.71)、(30.75±5.57)s,采集图像的总质量评分中位数分别为4、3、4分,标准 cine 序列与ss CS cine 序列图像的总质量评分差异有统计学意义($Z=-2.828, P=0.005$),而标准 cine 序列与2-shot CS cine 序列的评分差异无统计学意义($Z=-1.000, P=0.317$)。在心功能定量研究方面,标准 cine 序列与ss CS cine 序列之间除左室心肌质量[分别为100.25(47.30~136.02)g和101.25(48.30~135.30)g]差异有统计学意义($Z=-2.484, P=0.013$)外,其余指标差异均无统计学意义(P 均>0.05)。而标准 cine 序列与2-shot CS cine 序列之间各项心功能参数的差异均无统计学意义(P 均>0.05)。Spearman 相关分析显示,标准 cine 序列与ss CS cine 序列之间、标准 cine 序列与2-shot CS cine 序列之间,各项心功能参数均有良好的相关性(P 均<0.01)。**结论** 2-shot CS cine 序列与ss CS cine 序列的采集时间均较标准 cine 序列明显缩短,但2-shot CS cine 序列能够获得更接近标准 cine 序列质量的图像,心功能参数评估也更准确。

[关键词] 心脏病;多次激发;单次激发;压缩感知;电影磁共振成像

[中图分类号] R 541 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)03-0257-05

Two-shot compressed sensing techniques accelerate cardiac cine sequence acquisition and quantitative evaluation of the diagnostic efficacy

WANG Jian¹, LI Xiao¹, LIN Lu¹, CAO Jian¹, DAI Jing-wen¹, AN Jing², JIN Zheng-yu¹, WANG Yi-ning^{1*}

1. Department of Radiology, Peking Union Medical College Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100730, China

2. Siemens Healthineers, Shenzhen 518057, Guangdong, China

[Abstract] **Objective** To perform cardiac magnetic resonance (CMR) examination with 2-shot compressed sensing (CS) cardiac cine imaging (cine) technique, so as to obtain high-quality images that can quickly and accurately assess cardiac function and are closer to the standard cine sequence. **Methods** The patients, who underwent CMR examination in Department of Radiology of Peking Union Medical College Hospital of Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College from Jul. to Sep. 2018, were continuously enrolled. All enrolled patients received the standard cine sequence, single-shot (ss) CS cine sequence and 2-shot CS cine sequence image acquisition. Quantitative analyses of image quality and cardiac function were performed on each cine image acquired from different sequences. **Results** Twenty-two patients completed the three types of cine sequences. The average acquisition time of standard cine sequence, ss CS cine sequence and 2-shot CS cine sequence was (102.50±18.55), (20.50±3.71) and (30.75±5.57) s, respectively. The median total image quality scores of the standard, ss CS and 2-shot CS cine sequences were 4, 3 and 4, respectively. There was significant difference in the total quality scores between the standard cine

[收稿日期] 2018-10-29 **[接受日期]** 2019-01-15

[基金项目] 国家自然科学基金(81471725),科技部“十三五”国家重点研发计划(2016YFC1300402),2017年度北京市科技新星计划交叉学科合作课题(Z1711100001117136)。Supported by National Natural Science Foundation of China (81471725), “13th Five-Year” National Key Research and Development Plan of Ministry of Science and Technology of China (2016YFC1300402), and Beijing Science and Technology New Star Cross-Disciplinary Cooperation Project (Z1711100001117136)。

[作者简介] 王健, 博士, 住院医师。E-mail: wangjian_511@163.com

*通信作者(Corresponding author)。Tel: 010-69155509, E-mail: wangyining@pumch.cn

sequence and the ss CS cine sequence ($Z=-2.828, P=0.005$), while there was no significant difference between the standard cine sequence and the 2-shot CS cine sequence ($Z=-1.000, P=0.317$). In the quantitative study of cardiac function parameters, left ventricular myocardial mass was significantly different between the standard cine sequence and the ss CS cine sequence (100.25 [47.30-136.02] g vs 101.25 [48.30-135.30] g, $Z=-2.484, P=0.013$), but there were no significant differences in the other parameters. There were no significant differences in the cardiac function parameters between the standard cine sequence and the 2-shot cine sequence. Spearman correlation analysis showed that there were good correlations in the cardiac function parameters between the standard cine and the ss CS cine, and the standard cine and the 2-shot CS cine (all $P<0.01$). **Conclusion** The acquisition time of 2-shot CS cine and ss CS cine sequences is significantly shorter than that of standard cine sequence. However, 2-shot CS cine sequence can obtain images closer to the images obtained by standard cine sequence, which can be used to accurately evaluate the cardiac function.

[Key words] heart diseases; multi-shot; single-shot; compressed sensing; cine magnetic resonance imaging

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(3): 257-261]

心功能评价是心脏相关疾病诊疗的关键,是判断患者预后的重要指标^[1]。心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)具有软组织分辨率高且无辐射的优点,在心血管检查中的应用日益广泛^[2]。但受传统 Nyquist 采样定理的限制,其成像速度缓慢。为加快成像,可以采用编码快速采样序列进行采集,这需要不断增强梯度磁场、加快梯度磁场的切换,但因受到硬件条件的限制而不能轻易达到。同时,心律不齐与心功能不全的患者在检查过程中也往往不能获得具有诊断意义的图像,严重心力衰竭患者甚至不能耐受检查。Candès等^[3]于2006年提出了压缩感知(compressed sensing, CS)理论,利用信号的稀疏性,在小于 Nyquist 采样率条件下对 k-空间进行稀疏采样,并进行算法重建,以达到快速采样并不牺牲图像分辨率的目的。

CMR 按照一定顺序进行多个序列的采集,其中心脏电影成像(cardiac cine imaging,以下简称“cine”)被认为是评估心功能及左心室容积的“金标准”。标准 cine 序列采用平衡稳态自由进动(balanced steady-state free precession, bSSFP)序列^[4]进行扫描,因其高空间分辨率和时间分辨率的要求,需要心电门控和呼吸屏气的配合,且采样范围包括全部左心室,因此采集时间很长。利用 CS 技术进行快速 cine 成像可以加快检查时间,对于心律不齐及心功能不全的患者可以减少检查时的不适感,同时能够较准确地对心功能进行分析^[5]。CS 技术可分为单次激发(single-shot, ss)CS cine 技术和多次激发(multi-shot, ms) cine CS 技术,已有研究显示 ss CS cine 技术在评价左心室功能方面与标准 cine 序列具有一定的一致性^[6]。但也有

研究指出 ss CS cine 序列会降低心肌与周围组织的对比度,导致勾画心外膜和心内膜不够准确,从而造成一定的误差^[7]。而 ms CS cine 技术通过增加激发次数可以减小采样的稀疏性,从而增加图像对比度,提高图像质量。故本研究引入两次激发(2-shot)CS cine 技术,以求在不过多延长采集时间的情况下获得质量更高、更加接近标准 cine 序列、能够快速准确评估心功能的图像。

1 资料和方法

1.1 病例来源 连续纳入2018年7月至9月于中国医学科学院、北京协和医学院北京协和医院放射科进行 CMR 检查的患者。排除未能配合完成全部 cine 序列检查的患者。最终本研究纳入患者22例,其中男10例、女12例,平均年龄为(46.73±14.68)岁。临床诊断血液系统疾病心肌受累11例,免疫性疾病心肌受累5例,肢端肥大症2例,扩张型心肌病2例,肥厚型心肌病1例,房室传导阻滞1例。2例患者伴心律不齐,其中1例为血液系统疾病心肌受累患者、1例为房室传导阻滞患者。本研究已通过中国医学科学院、北京协和医学院北京协和医院伦理委员会审批(伦理审批号 JS-1499)。

1.2 检查方法 所有患者均签署知情同意书。采用德国西门子医疗系统有限公司 Skyra 3.0 T 超导型磁共振成像系统,在不注射造影剂的情况下分别进行标准 cine、ss CS cine 和 2-shot CS cine 采集,各序列扫描参数如表1所示。采集层面包括左心室长轴两腔心、三腔心、四腔心和左房室瓣口到心尖覆盖整个左心室等间距相互平行的9个短轴层面。采集过程中记录每个序列的扫描时间。

表1 心脏磁共振各序列扫描参数

Tab 1 Scanning parameters of each cardiac magnetic resonance sequence

Parameter	Standard cine	ss CS cine	2-Shot CS cine
ECG gating	Retrospective	Retrospective	Retrospective
TE/TR <i>t</i> /ms	1.4/3.3	1.2/2.9	1.3/3.0
FOV <i>d</i> /mm	340×265	380×300	380×280
Image matrix	208×113	208×113	208×113
Spatial resolution <i>d</i> /mm	1.6×1.6	1.7×1.7	1.6×1.5
Temporal resolution <i>d</i> /mm	45	42	42
Slice thickness <i>d</i> /mm	8	8	8

ss: Single-shot; CS: Compressed sensing; ECG: Electrocardiography; TE: Echo time; TR: Repetition time; FOV: Field of view

1.3 图像质量分析 采用荷兰 Medis 医学影像公司 Medis Suite 3.1 医学影像后处理软件进行数据重建和定量分析。所有序列图像随机分配, 由两名有经验的放射科医师独立进行定性、定量评价。

依据血池与心肌对比度对所有图像进行总体质量评分, 记为 1~4 分。1 分: 图像质量很差, 无法用于诊断; 2 分: 血池与心肌对比较差或伪影较重, 可能影响诊断; 3 分: 血池与心肌对比较好, 虽有伪影存在, 但不影响诊断; 4 分: 血池与心肌对比较好, 无伪影存在。

1.4 心功能定量分析 应用 Medis Suite 3.1 软件, 利用短轴层面图像进行心功能参数分析。观察确定基底部与心尖部层面, 选择舒张末期和收缩末期。手动描记心内膜和心外膜, 依据辛普森法则 (Simpson's rule)^[8] 计算得到左心室形态学和功能学参数, 包括左心室舒张末期容积 (left ventricular end-diastolic volume, LVEDV)、左心室收缩末期容积 (left ventricular end-systolic volume, LVESV)、左心室每搏输出量 (left ventricular stroke volume, LVSV)、左心室射血分数 (left ventricular ejection fraction, LVEF)、左心室心输出量 (left ventricular cardiac output, LVCO) 及左心室心肌质量 (left ventricular mass, LV_{mass})。

1.5 统计学处理 采用 SPSS 24.0 软件进行数据处理。计量资料若符合正态分布以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 任意两种 cine 序列之间比较采用配对 *t* 检验; 若为偏态分布则以中位数 (范围) 表示, 任意两种 cine 序列之间比较采用 Wilcoxon 符号秩和检验。计数资料以例数表示。计量资料若符合正态分布, 其相关性分析采用 Pearson 相关分析; 若不符合正态分布则采用 Spearman 相关分析。检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 CMR 各 cine 序列检查时间和图像总体质量评分分析 扫描过程中 22 例患者的平均心率为 (72±12) 次/min; 标准 cine 序列、ss CS cine 序列、2-shot CS cine 序列的采集时间分别为 (102.50±18.55)、(20.50±3.71)、(30.75±5.57) s, 相较于标准 cine 序列, 2-shot CS cine 序列与 ss CS cine 序列的采集时间均缩短, 差异均有统计学意义 ($t=25.075$ 、 25.080 , P 均 < 0.01)。

22 例患者标准 cine 序列、ss CS cine 序列、2-shot CS cine 序列图像的的总体质量评分中位数分别为 4 分、3 分、4 分。标准 cine 序列与 ss CS cine 序列图像的的总体质量评分差异有统计学意义 ($Z=-2.828$, $P=0.005$), 而标准 cine 序列与 2-shot CS cine 序列的评分差异无统计学意义 ($Z=-1.000$, $P=0.317$)。采用 3 种序列采集的典型图像见图 1。

2.2 CMR 各 cine 序列心功能参数比较 22 例患者的心功能参数定量分析结果见表 2。标准 cine 序列与 ss CS cine 序列之间、标准 cine 序列与 2-shot CS cine 序列之间, LVEDV、LVESV、LVEF、LVCO 差异均无统计学意义 (P 均 > 0.05)。标准 cine 序列获得的 LV_{mass} 低于 ss CS cine 序列, 差异有统计学意义 ($Z=-2.484$, $P=0.013$), 而标准 cine 与 2-shot CS cine 序列之间差异无统计学意义 ($Z=-1.851$, $P=0.064$)。

对 22 例患者 LVEDV、LVESV、LVEF、LVCO 和 LV_{mass} 进行 Spearman 相关分析, 结果 (表 3) 显示标准 cine 序列与 ss CS cine 序列之间、标准 cine 序列与 2-shot CS cine 序列之间上述左心室形态和功能学参数均有良好的相关性 ($r=0.958\sim 0.994$, P 均 < 0.01)。

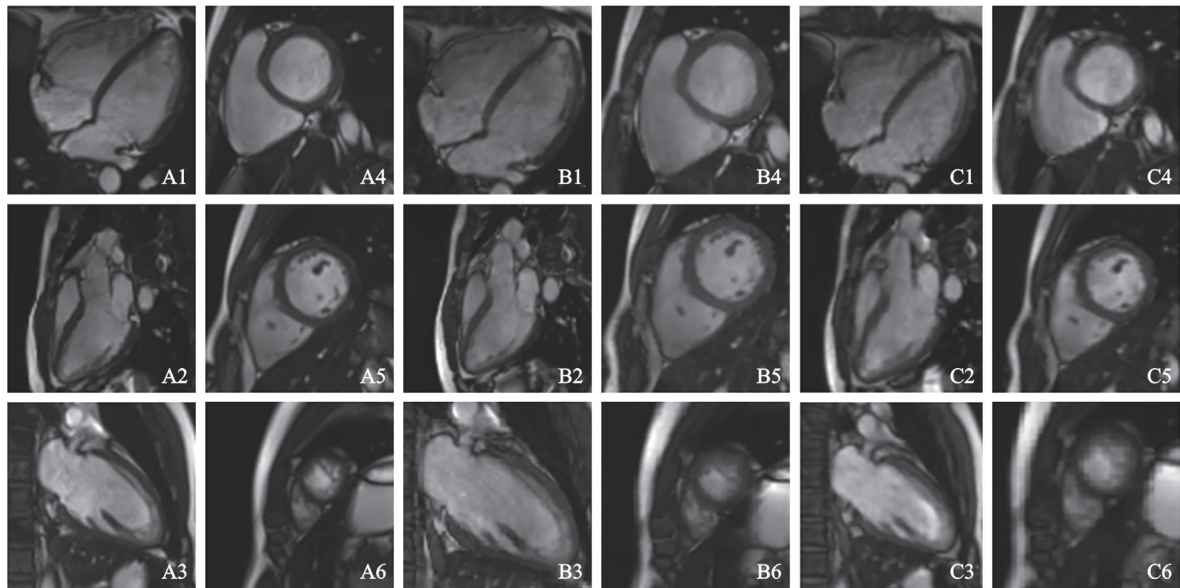


图1 心脏磁共振各序列采集的图像

Fig 1 Images captured by each cardiac magnetic resonance sequence

Male, 27 years old, dilated cardiomyopathy. A1-A6: Standard cine; B1-B6: Single-shot compressed sensing cine; C1-C6: Two-shot compressed sensing cine. A1, B1, C1: Long-axis 4-chamber heart; A2, B2, C2: Long-axis 3-chamber heart; A3, B3, C3: Long-axis 2-chamber heart; A4, B4, C4: Short-axis heart-bottom segment; A5, B5, C5: Short-axis middle segment; A6, B6, C6: Short-axis apex segment

表2 心脏磁共振各序列心功能参数比较

Tab 2 Comparison of cardiac function parameters obtained by each cardiac magnetic resonance sequence

Parameter	Standard cine	ss CS cine	2-Shot CS cine	<i>n</i> = 22, median (range)			
				Z value ^a	<i>P</i> value ^a	Z value ^b	<i>P</i> value ^b
LVEDV <i>V</i> /mL	119.95 (68.20-269.20)	120.44 (67.30-268.40)	123.17 (69.50-266.90)	-1.948	0.051	-1.883	0.060
LVESV <i>V</i> /mL	46.55 (17.50-205.90)	47.01 (15.00-209.40)	45.96 (15.20-206.50)	-1.641	0.101	-0.731	0.465
LVEF (%)	59.85 (23.50-82.80)	58.78 (21.98-85.03)	61.65 (22.63-84.83)	-0.568	0.570	-0.195	0.846
LVCO (L · min ⁻¹)	4.55 (3.53-7.05)	4.67 (3.54-6.86)	4.54 (3.56-7.05)	-1.026	0.305	-0.939	0.348
LV _{mass} <i>m</i> /g	100.25 (47.30-136.02)	101.25 (48.30-135.30)	102.10 (49.22-140.90)	-2.484	0.013	-1.851	0.064

^a: Comparing results between standard cine and ss CS cine sequences; ^b: Comparing results between standard cine and 2-shot CS cine sequences. ss: Single-shot; CS: Compressed sensing; LVEDV: Left ventricular end-diastolic volume; LVESV: Left ventricular end-systolic volume; LVEF: Left ventricular ejection fraction; LVCO: Left ventricular cardiac output; LV_{mass}: Left ventricular mass

表3 心脏磁共振各序列之间心功能参数的

Spearman 相关分析

Tab 3 Spearman correlation analysis of cardiac function parameters obtained by each cardiac magnetic resonance sequence

Parameter	Standard cine vs ss CS cine		Standard cine vs 2-shot CS cine	
	<i>r</i>	<i>P</i> value	<i>r</i>	<i>P</i> value
LVEDV	0.989	<0.01	0.991	<0.01
LVESV	0.992	<0.01	0.994	<0.01
LVEF	0.984	<0.01	0.958	<0.01
LVCO	0.960	<0.01	0.988	<0.01
LV _{mass}	0.972	<0.01	0.993	<0.01

ss: Single-shot; CS: Compressed sensing; LVEDV: Left ventricular end-diastolic volume; LVESV: Left ventricular end-systolic volume; LVEF: Left ventricular ejection fraction; LVCO: Left ventricular cardiac output; LV_{mass}: Left ventricular mass

3 讨论

心功能评价是 CMR 检查中的重要内容, 很多疾病的发生、发展、治疗和预后与心功能变化密切相关^[1]。CMR 能够无创定量心功能, 其原理不是超声心动图和心血管造影等手段对心腔进行的数学模型假设, 而是扫描范围覆盖心腔、通过直接计算得出, 因此结果更加准确。

传统的 bSSFP 序列是目前评估心功能的主要序列, 其扫描时间相对较长, 为达到足够的图像分辨率, 一般 1 次屏气只扫描 1 层, 进行多层成像时需要反复进行屏气配合。同时, 由于采集时间窗位于心动周期舒张末期平台期, 要求患者心律相对整齐。对于耐受能力差、不能长时间配合反复屏气或

心率不齐的患者, 需要一种能够减少屏气次数或能够在自由呼吸状态下成像、同时保证图像质量的方法^[9]。如采用自由呼吸状态, 则需要同步呼吸运动和心脏自身周期运动, 无论是采用呼吸门控或是膈肌导航方式, 都需要患者配合均匀呼吸, 无疑会增加成像的难度和时间。CS 技术进行快速 cine 成像可以加快检查时间, 且由于其采样的稀疏性, 对于心律不齐亦不敏感。本研究发现, 相较于 ss CS cine 序列, 2-shot CS cine 序列获得的图像总体质量评分更高, 更接近标准 cine 序列。对于 2 例心律不齐的患者, 相较于标准 cine 序列, 2-shot CS 序列图像伪影较少, 而图像质量与 ss CS cine 序列相近, 但在研究中获得的图像质量评分相同 (均为 3 分)。同时, 研究发现对于标准 cine 序列上显示瓣膜存在反流的情况, 采用 ss CS cine 序列往往不能很好地显示, 而 2-shot CS cine 序列则显示相对清晰^[10]。因此相对于 ss CS 技术, 2-shot CS 技术采集的 cine 图像细节更丰富、图像质量更高。

本研究以目前 bSSFP 分段采集的标准 cine 序列测量得到的左心室参数为标准参照, 对比分析采用 CS 稀疏采样的 ss CS cine 序列和 2-shot CS cine 序列测量得到的左心室参数。结果显示, 标准 cine 序列与 2-shot CS cine 序列获得的各项左心室参数差异均不具有统计学意义, 而标准 cine 序列与 ss CS cine 序列获得的各项左心室参数除 LV_{mass} 外, 差异亦不具有统计学意义。分析其原因, ss CS cine 序列获得图像分辨率较低, 心内膜与心外膜的边界显示略模糊, 但因心肌与血池的对比相较于心肌与周围组织的对比更强烈, 故心内膜勾画相对准确。而 2-shot CS cine 序列图像由于采集过程中获得的数据量更多, 图像质量更好, 对心内膜与心外膜的显示更清晰, 勾画心内膜及心外膜边界更准确, 计算的相关数值更准确。

本研究存在以下局限性: (1) 样本量小; (2) 入组样本皆为患者, 尚缺乏健康志愿者对照数据; (3) 未对右心功能及心脏舒张功能进行评价比较。在今后的研究工作中, 将适当增加样本量和健康志愿者数据, 并尝试分析评估右心功能及心脏舒张功能。

[参 考 文 献]

- [1] VON KNOBELSDORFF-BRENKENHOFF F, SCHULZ-MENGER J. Role of cardiovascular magnetic resonance in the guidelines of the European Society of Cardiology[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18: 6. doi: 10.1186/s12968-016-0225-6.
- [2] KRAMER C M, BARKHAUSEN J, FLAMM S D, KIM R J, NAGEL E; Society for Cardiovascular Magnetic Resonance Board of Trustees Task Force on Standardized Protocols. Standardized cardiovascular magnetic resonance (CMR) protocols 2013 update[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15: 91. doi: 10.1186/1532-429X-15-91.
- [3] CANDÈS E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006, 52: 489-509.
- [4] LEI X, LIU H, HAN Y, CHENG W, SUN J, LUO Y, et al. Reference values of cardiac ventricular structure and function by steady-state free-precession MRI at 3.0 T in healthy adult Chinese volunteers[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 45: 1684-1692.
- [5] GAMPER U, BOESIGER P, KOZERKE S. Compressed sensing in dynamic MRI[J]. *Magn Reson Med*, 2008, 59: 365-373.
- [6] KIDO T, KIDO T, NAKAMURA M, WATANABE K, SCHMIDT M, FORMAN C, et al. Compressed sensing real-time cine cardiovascular magnetic resonance: accurate assessment of left ventricular function in a single-breath-hold[J/OL]. *J Cardiovasc Magn*, 2016, 18: 50. doi: 10.1186/s12968-016-0271-0.
- [7] VINCENTI G, MONNEY P, CHAPTINEL J, RUTZ T, COPPO S, ZENGE M O, et al. Compressed sensing single-breath-hold CMR for fast quantification of LV function, volumes, and mass[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7: 882-892.
- [8] HERGAN K, SCHUSTER A, FRÜHWALD J, MAIR M, BURGER R, TÖPKER M. Comparison of left and right ventricular volume measurement using the Simpson's method and the area length method[J]. *Eur J Radiol*, 2008, 65: 270-278.
- [9] 尹刚, 陈秀玉, 崔辰, 范阳, 杨新令, 赵世华. 心脏磁共振单次屏气三维容积电影成像在心脏功能评价中的应用[J]. *放射学实践*, 2018: 156-160.
- [10] MERLOCCO A, CROSS R, KELLMAN P, XUE H, HANSEN M, OLIVIERI L. Validation of CMR-derived left ventricular strain measurements by free-breathing motion-corrected cine imaging[J/OL]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 69: 1448. doi: 10.1016/S0735-1097(17)34837-4.

[本文编辑] 杨亚红