

· 影像医学研究 ·

基于压缩感知的心脏实时电影技术在评估左心房功能中的价值

陈 杨,朱晓梅*,秦 捷,祝因苏,徐 怡

南京医科大学第一附属医院放射科,江苏 南京 210029

[摘要] 目的:以传统的分层心脏电影成像(segmented cine imaging)为金标准,评估基于压缩感知(compressed sensing, CS)心脏实时电影在评价左心房功能中的价值。方法:纳入健康的志愿者40例和心超提示左心室舒张功能下降的心脏疾病患者31例,基于稳态平衡自由进动序列完成分层电影和CS实时电影的左心房数据采集,2名放射科医师独立对图像质量进行定性分析,并用CVI42图像后处理软件获得左心房径线、容积和射血分数(ejection fraction, EF),并同步进行定量分析。结果:CS电影和传统电影的图像质量无明显差异。两种电影获得左心房径线参数有较好的相关性($ICC>0.90$)。除了主动射血分数外,两种电影获得的容积及射血分数均有较好的相关性($ICC>0.80$)。两种电影获得的左心房二腔心和四腔心横径无明显差异。与金标准相比,CS电影高估了左心房最小容积,但是差距较小[(4.45 ± 11.18)mL, $P=0.003$]。两种方法获得的左心房最大容积、收缩前容积和被动射血分数差异无统计学意义。CS电影能较好地地区分正常人和左心房功能异常的患者。结论:,CS电影可用来准确分析左心房径线和容积,尤其是左心房被动射血分数。

[关键词] 心脏磁共振;压缩感知;心脏电影;左心房

[中图分类号] R445

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2021)02-252-07

doi: 10.7655/NYDXBNS20210220

The value of compressed sensing cardiac cine magnetic resonance imaging for analysis of left atrial function

CHEN Yang, ZHU Xiaomei*, QIN Jie, ZHU Yinsu, XU Yi

Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China

[Abstract] **Objective:** This study aims to evaluate the value of compressed sensing (CS) cine cardiac magnetic resonance (CMR) for left atrial (LA) functional assessment compared with traditional segmented cine imaging (regarded as gold standard). **Methods:** Forty healthy volunteers and thirty-one patients with reduced left ventricular diastolic function by echocardiography underwent segmented cine and CS cine imaging with steady-state free-precession sequence to cover LA during CMR. LA diameter, volume and ejection fraction (EF) were evaluated by CVI42 (circle cardiovascular imaging, Canada). Two radiologists independently performed qualitative analysis of image quality and quantitative analysis of all above LA parameters. **Results:** The image quality was no significant difference between traditional and CS cine. There was an excellent correlation for LA diameter ($ICC>0.90$) and good correlation for LA volume, EF between both cines ($ICC>0.80$), except for active EF. There were no significant difference in LA 2- and 4-chamber transverse diameters derived from both cines. Compared to the gold standard, the CS cine overestimated LA minimal volume, but the difference was small [(4.45 ± 11.18) mL, $P=0.003$]. The LA maximal volume, pre-active volume and passive EF obtained by the two methods had no statistical difference. CS cine more accurately distinguished volunteers from patients with abnormal LA function than segmented cine. **Conclusion:** CS cine can be used to accurately evaluate LA diameter and volume for LA functional assessment, especially passive EF of LA.

[Key words] cardiac magnetic resonance imaging; compressed sensing; cardiac cine MRI; left atrium

[J Nanjing Med Univ, 2021, 41(02): 252-257, 273]

[基金项目] 国家自然科学基金(81701654, 81601464)

*通信作者(Corresponding author), E-mail: xiaomeizhu@njmu.edu.cn

生理条件下,左心房功能主要分为储血功能、导管功能及泵功能,可调节左心室充盈量和维持正常心搏量,左心房径线和容积在判断多种心血管疾

病预后及危险分层中起到重要作用,尤其是那些与左心室舒张功能受损相关的疾病^[1-2]。心脏磁共振常规电影可以清晰地显示左心房结构,并且可以测量、计算左心房功能^[3]。但是传统心脏磁共振(cardiac magnetic resonance imaging, CMR)电影扫描时间长,在扫描过程中需要被检者心律整齐并配合屏气,而临床上许多被检者本身就有心脏疾病,在检查过程中易发生心律失常或者屏气欠佳,造成图像质量下降。压缩感知(compressed sensing, CS)技术是一种加速成像技术,它极大缩短了CMR图像采集时间并获得较高质量的图像^[4],但是图像对比度轻度下降。目前,基于CS技术的心脏电影主要是用于评估左心室的容积功能,并且此技术在缩短扫描时间的同时,可以准确评估左心室容积和功能^[5]。但是左心房与左心室比较,形态更不规则,心肌壁更薄,运动方式也不全相同,因而基于CS的心脏电影技术能否准确评估左心房大小和功能还需要进一步验证,目前此方面的研究非常少。本研究旨在探讨以传统分层电影技术为金标准,评估压缩感知技术是否是一种分析左房容积和功能的有效可靠的方法。

1 对象和方法

1.1 对象

纳入2018年4月—2020年6月招募的40例健康志愿者,志愿者纳入标准:既往无任何心血管病史;血压正常(BP < 140/90 mmHg);心电图正常;超声心动图未见异常。选取心超提示左心室舒张功能下降的36例心脏疾病患者构成患者组。排除标准:体内植入起搏器或其他金属植入物者;幽闭恐惧症患者;图像不全或质量不佳者。本研究经院伦理委员会批准,所有志愿者及患者均知情同意。最终共纳入30例志愿者构成正常组,其中,男22例,女8例,年龄(39±14)岁(22~66岁),心率(74±10)次/min(57~99次/min)。患者组最终纳入31例心脏疾病患者(缺血性心肌病3例、扩张性心肌病13例、肥厚性心肌病5例、心律失常4例、心肌炎4例、淀粉样变性1例和缩窄性心包炎1例),其中,男21例,女10例,年龄(51±15)岁(26~83岁),心率(70±14)次/min(42~102次/min)。两组性别、年龄及心率无明显差异($P > 0.05$)。

1.2 方法

1.2.1 CMR 图像

采用3.0T磁共振成像系统(Siemens,德国)。传

统分层电影成像采用回顾性心电向量门控,运用快速平衡稳态进动序列(steady state free precession, SSFP)进行电影成像扫描,每个心动周期为25个时相。CS电影成像,采用前瞻性心电向量门控数据采集,回顾性重建1个心动周期,获得25个时相。扫描获得二腔、四腔心长轴位电影图像,在吸气末屏气采集图像,传统分层电影需要10~15 s,CS电影需要2~3 s。两种成像方法扫描参数是一致的,回波时间1.4 ms,翻转时间3.4 ms,FOV 35 mm×350 mm,翻转角50°,矩阵208×166,层厚8 mm,层间距0 mm,每个心动周期采集25帧电影图像。

1.2.2 图像处理分析

1.2.2.1 评估图像质量

2位放射科医师对图像质量依据左心房的边界和图像伪影将图像分为4级:1级图像质量差,重度伪影,无法进行边缘描画和容积评估;2级图像质量尚可,中度伪影,可以进行边缘描画和容积评估;3级图像质量良好,轻度伪影,不影响边缘描画和容积评估;4级图像质量佳,无伪影^[5]。

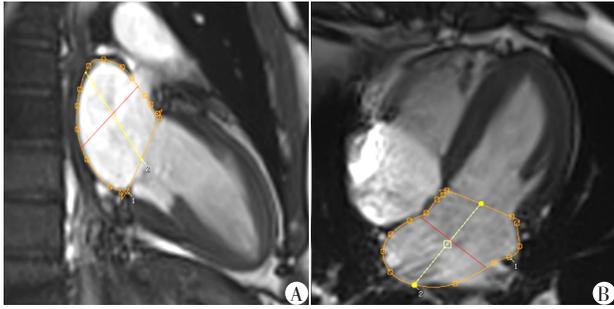
1.2.2.2 左心房径线和容积分析

左心房容积分析采用CVI42(circle cardiovascular imaging,加拿大)软件。用目测法结合二尖瓣及主动脉瓣运动找到左心房收缩末期即左房最小容积(left atrial minimal volume, LAV_{min})、舒张末期即左房最大容积(left atrial maximal volume, LAV_{max})及主动收缩前期3个时相(left atrial pre-systolic volume, LAV_{pre})。左心房收缩末期即左室收缩开始时二尖瓣关闭后、主动脉瓣开放前的时相;左心房舒张末期即左室舒张期二尖瓣开放之前的最后一个时相;左心房主动收缩前期即左室舒张末期二尖瓣再次开放前的最后一个时相,分别在这3个时相的二腔与四腔心上手动勾画出左心房的面积、左心房长径(二腔心和四腔心长径)和横径(二腔心和四腔心横径)^[6],左心房腔不包含左心耳及肺静脉(图1)。左心房容积是利用双平面面积-长度方法估算,根据公式: $LAV = (S_{2CH} \times S_{4CH} \times 0.85) / L$, S_{2CH} 是二腔心左心房面积, S_{4CH} 是四腔心左心房面积, L 为二腔与四腔心左心房长径较短者,获得左心房最大容积(LAV_{max})、最小容积(LAV_{min})、收缩前容积(LAV_{pre}),并根据以下公式获得左心房射血分数:左心房总射血分数(EF_{total})、被动射血分数(EF_{passive})、主动射血分数(EF_{booster})^[7]。

$$EF_{total} = (LAV_{max} - LAV_{min}) \times 100 / LAV_{max}$$

$$EF_{passive} = (LAV_{max} - LAV_{pre}) \times 100 / LAV_{max}$$

$$EF_{booster} = (LAV_{pre} - LAV_{min}) \times 100 / LAV_{pre}$$



在左心房舒张末期,分别在二腔心(A)和四腔心(B)上测量左心房长径(黄色)、横径(红色)和左心房面积(橙色)。

图1 左心房径线及容积计算

Figure 1 Calculating LA diameter and volume

左心房参数均由2位放射科医师独立分析(心血管影像2年及10年以上经验)。

1.3 统计学方法

计量数据以均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,并使用SPSS23.0进行分析。用Wilcoxon配对样本符号秩检验比较传统电影和CS电影的图像质量。2位放射科医师获得的左心房径线、容积及收缩功能参数用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)分析观察者间及观察者内的一致性。使用配对样本t检验对两种电影间的左心房参数进行比较,用ICC分析两组间参数的相关性。用独立样本t检验比较正常组和患者组两组间传统电影和CS电影获得的左心房参数。用线性回归和Bland-Altman检验分析两种电影间左心房二腔和四腔心横径、LAV_{max}

和EF_{passive},以评估两种电影间的相关性和一致性。ICC≥0.90,相关性非常好;0.75≤ICC<0.90,相关性较好;0.50≤ICC<0.75,相关性一般;ICC<0.50,相关性较低。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 图像质量及重复性分析

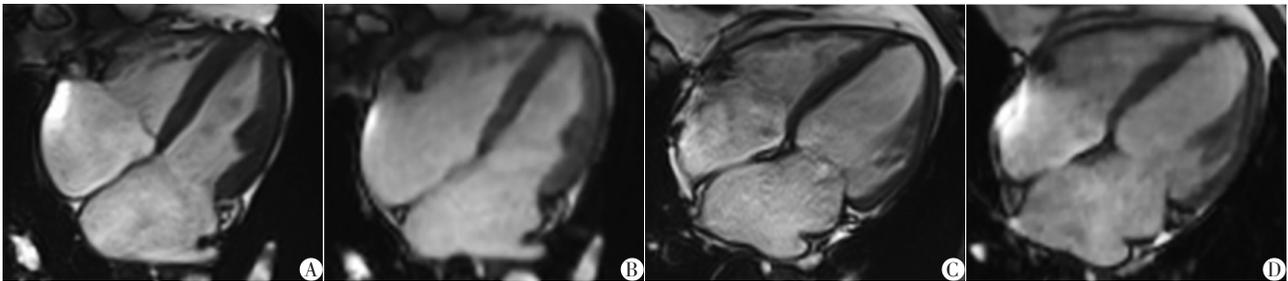
对于左心房图像质量两种方法无明显统计学差异(3.75±0.42 vs.3.78±0.44,P=0.556,图2)。左心房径线和容积参数观察者间及观察者内一致性好(ICC>0.9)。

2.2 左心房径线

CS电影和传统电影获得左房径线有非常好的相关性(ICC>0.90)。2种电影获得的左房舒张末期二腔心和四腔心横径无明显差异。与传统电影相比,CS电影低估了左心房二腔心和四腔心长径,但差别较小(差值<2 mm,表1)。线性回归和Bland-Altman分析发现2种电影对于二腔心和四腔心横径有好的相关性和比较小的差异(图3)。

2.3 左心房容积及射血分数

除主动射血分数外(EF_{booster}, ICC=0.779),CS电影和传统电影获得的容积和射血分数均有好的相关性(ICC>0.80)。与金标准相比,CS电影获得的LAV_{max}和LAV_{pre}无明显差异,而CS电影高估了LA_{min},但是差比较小[(4.46±11.18)mL,P=0.003],导致总的射血分数及主动射血分数低估[EF_{total}低估约



以四腔心为例,A、B是1例47岁男性志愿者的图像,A为传统电影图像,B为CS电影图像,C、D是1例64岁男性扩张性心脏病患者的图像,C为传统电影图像,D为CS电影图像。

图2 传统电影和CS电影图像质量比较

Figure 2 Comparison of image quality between traditional cine and CS cine

表1 传统电影与压缩感知电影之间左心房舒张末期径线的比较

Table 1 Comparison LA end-diastolic diameters between traditional cine and CS cine (mm, $\bar{x} \pm s$)

径线参数	传统电影	CS电影	差值	P值	ICC
二腔心横径	48.92 ± 11.18	49.23 ± 11.19	0.30 ± 3.29	0.471	0.957
二腔心长径	55.30 ± 10.50	54.05 ± 9.24	-1.25 ± 3.90	0.015	0.922
四腔心横径	48.01 ± 10.49	48.27 ± 10.63	0.26 ± 3.22	0.532	0.954
四腔心长径	56.19 ± 9.13	54.65 ± 9.62	-1.54 ± 3.35	0.001	0.936

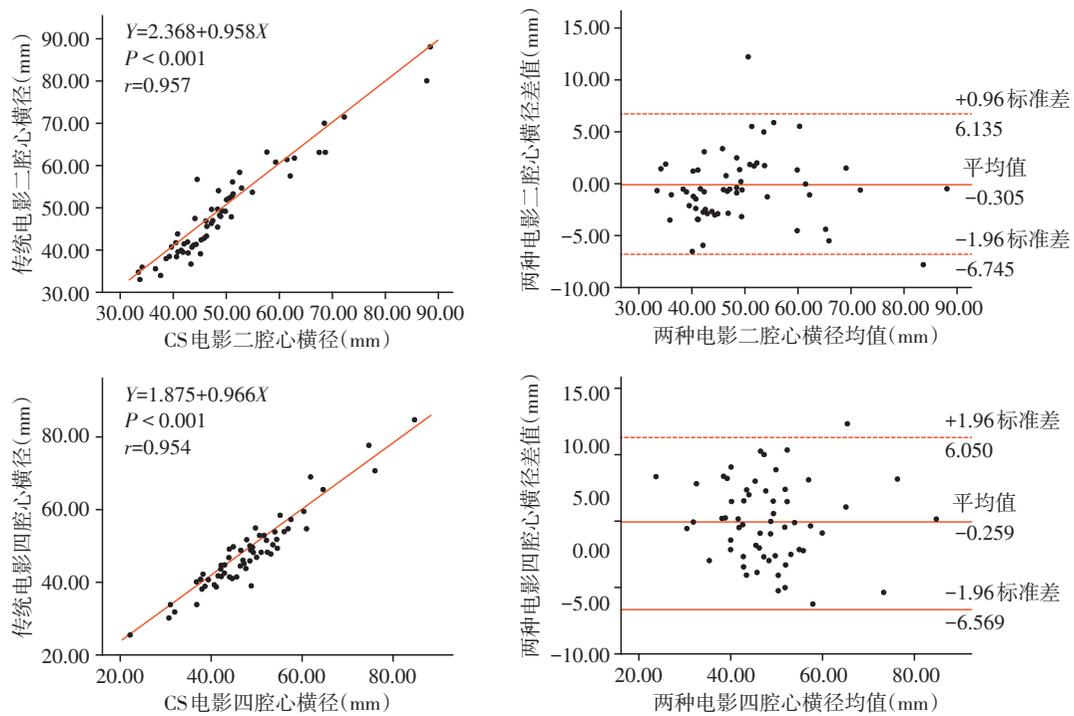


图3 传统电影和CS电影间左心房二腔心和四腔心横径的线性回归方程及Bland-Altman散点图

Figure 3 Correlation and Bland-Altman plots for LA 2- and 4-chamber transverse diameters by traditional cine and CS cine

(5.96 ± 8.17)%, $P < 0.001$; EF_{booster} 低估约 (8.66 ± 8.61)%, $P < 0.001$; 表2],但是2种电影获得的被动射血分数无统计学差异。线性回归和Bland-Altman分析发现两种电影在比较 LAV_{max} 和 EF_{passive} 上有较好的相关性和较小的差异(图4)。

2.4 CS电影获得左心房参数诊断左心房增大的能力
传统电影提示左心房舒张末期径线和容积参数在正常组与患者组间均有统计学差异。尽管左心房部分径线(长径)和左心房容积参数(LAV_{min} 、 EF_{total} 和 EF_{booster})在2种电影间存在统计学差异,但是

表2 传统电影与压缩感知电影之间左心房容积参数的比较

Table 2 Comparison LA volume parameters between traditional cine and CS cine

容积参数	传统电影	CS电影	差值	P值	ICC
LAV_{min} (mL)	71.70 ± 68.91	76.16 ± 72.47	4.46 ± 11.18	0.003	0.987
LAV_{max} (mL)	108.50 ± 69.11	106.26 ± 73.47	-2.23 ± 14.10	0.221	0.980
LAV_{pre} (mL)	87.07 ± 66.68	85.85 ± 71.74	-1.22 ± 11.36	0.405	0.987
EF_{total} (%)	41.57 ± 18.62	35.61 ± 17.38	-5.96 ± 8.17	<0.001	0.897
EF_{passive} (%)	23.47 ± 12.38	23.85 ± 13.48	0.38 ± 6.87	0.667	0.859
EF_{booster} (%)	25.08 ± 14.41	16.42 ± 11.27	-8.66 ± 8.61	<0.001	0.779

CS电影依然提示患者组的左心房径线、容积参数均大于正常组,并且患者组的左心房射血功能下降(表3)。

3 讨论

传统心脏电影采集图像时需要被检者多次屏气且心律规则,而许多被检者呼吸配合欠佳或有心律失常,采集的图像质量较差,影响心功能的评

估。压缩感知技术应用稀疏表示、观测矩阵和重构算法这三步快速地获取图像,丢弃了图像上大量无用的信息,从而大大缩短了成像时间^[8]。此外,尽管压缩感知获得的信噪比稍有降低,但它可以降低呼吸配合欠佳和心律不齐对图像质量的影响^[9]。先前研究已证实了基于压缩感知的心脏电影技术可以显著减少心脏磁共振成像时间^[10];同时可以准确评估各类人群的左心室功能,但很少有研究探讨用压

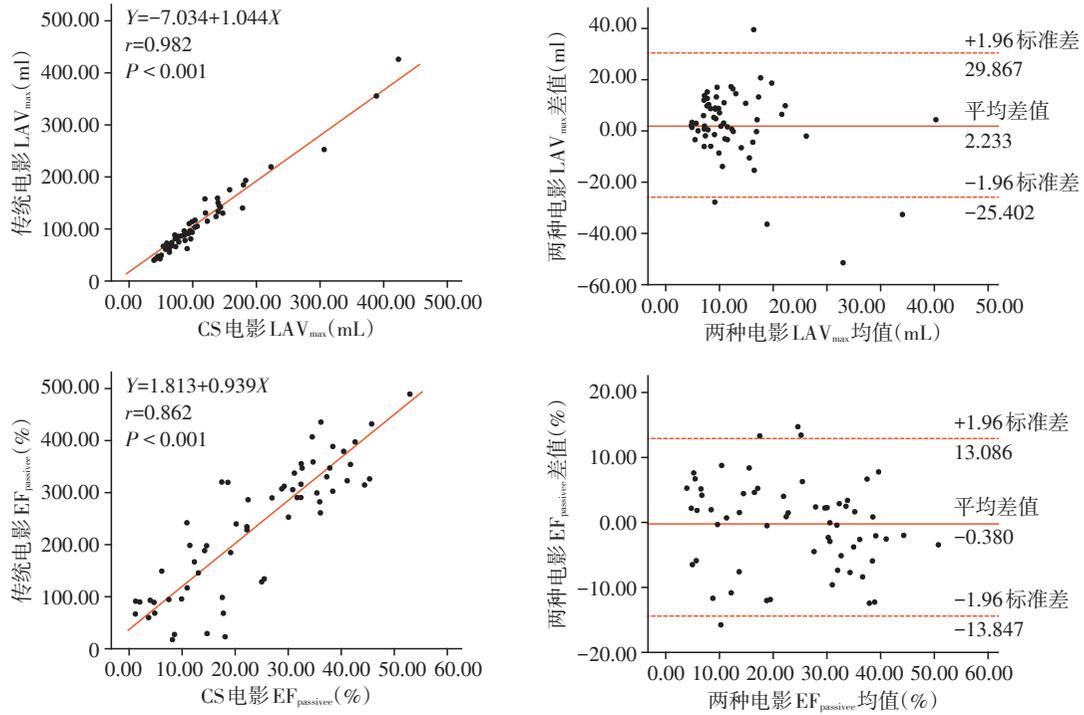


图4 传统电影和CS电影间左心房最大容积(LAV_{max})和被动射血分数(EF_{passive})的线性回归方程及Bland-Altman散点图

Figure 4 Correlation and Bland-Altman plots for LAV_{max} volume and EF_{passive} by traditional cine and CS cine

表3 正常组和患者组间传统电影和CS电影获得的左心房径线和容积的比较

Table 3 Comparison LA diameter and volume derived from traditional cine and CS cine between normal group and patient group ($\bar{x} \pm s$)

指标	传统电影			CS电影		
	正常组	患者组	P值	正常组	患者组	P值
左心房径线(mm)						
二腔心横径	41.16 ± 4.08	56.44 ± 10.74	0.006	42.63 ± 4.07	55.61 ± 12.20	< 0.001
二腔心长径	48.58 ± 5.22	61.80 ± 10.26	0.001	48.57 ± 4.79	59.35 ± 9.45	0.003
四腔心横径	44.01 ± 6.05	51.88 ± 12.37	0.031	44.20 ± 5.81	52.21 ± 12.68	0.020
四腔心长径	50.63 ± 5.67	61.57 ± 8.66	0.016	44.20 ± 5.53	60.71 ± 8.86	0.006
左心房容积(mL)						
LAV _{min}	31.38 ± 9.03	110.72 ± 78.87	< 0.001	34.60 ± 10.14	116.37 ± 83.71	< 0.001
LAV _{max}	71.90 ± 16.20	143.91 ± 81.63	< 0.001	67.50 ± 15.65	143.78 ± 87.18	< 0.001
LAV _{pre}	49.03 ± 11.50	123.89 ± 76.93	< 0.001	45.42 ± 11.85	124.98 ± 83.32	< 0.001
EF _{total}	56.25 ± 8.16	27.36 ± 14.32	< 0.001	48.72 ± 9.15	22.92 ± 13.61	< 0.001
EF _{passive}	31.70 ± 6.81	15.50 ± 11.33	< 0.001	32.81 ± 8.17	15.18 ± 11.88	< 0.001
EF _{booster}	36.23 ± 7.81	14.30 ± 10.58	< 0.001	23.90 ± 8.48	9.18 ± 8.63	< 0.001

缩感知技术研究左房功能的可行性。本研究分析了健康人和左心室舒张功能受限的患者CMR传统电影和压缩感知电影的左心房径线、容积及收缩功能参数。结果显示,CS电影获得的径线和容积参数与传统电影相关性好,虽轻度低估了左心房二腔心和四腔心长径,且高估了左心房最小容积,但是在区分正常组和患者组的能力方面无下降。

CS电影可以清晰显示左心房边界,因而可以准确评估左心房横径。CS电影轻度低估了左心房的长径,这可能是由于压缩感知技术降低了心肌与血池之间的对比,且二尖瓣及主动脉瓣运动界定相对比较困难。此外,本研究提示CS电影会高估左心房最小容积,这可能是由于在左心房收缩末期,左心房的面积较小,即使边缘描画的较小误差也会导致

左心房最小容积出现较大误判。

各种心血管疾病长期影响左心房,会引起左房容积增加,射血分数降低,进而导致左房重构,左心房重构是无症状患者发生房颤的独立危险因素和疾病预后的判断标准^[11-12]。目前临床上评估左心房功能主要是用左心房径线和容积,其中LAV_{max}与心血管疾病的关系最为密切,在预测心血管事件和危险分层方面最为敏感^[13]。之前研究已证实CS电影能较好地反映左心室容积并获得较好的图像,可用于临床评估左心室功能^[14]。本研究发现CS电影可以获得较高质量的左心房图像,并不低于传统心脏电影。Sohrabi等^[15]研究发现左心房横径较长径能更准确地检测出左房增大。在本研究中,CS电影获得的左心房横径与传统电影相关性佳且无差异,因而我们推测CS心脏电影可以准确显示左心房径线的改变,并且本研究也证实CS电影可以准确检测出正常组与病患间左心房径线的差异。CS电影获得的LAV_{max}和LAV_{pre}与传统电影无明显差异,虽然它低估了LAV_{min},但是与传统电影获得的容积参数有较好的相关性,且CS电影区分正常组和病患组左心房功能差异的能力无降低,因而相信CS电影可以用于左心房容积的评估。

左心房被动射血分数主要反映左室舒张功能,在临床上更受到重视^[16];CS技术获得的左心房EF_{passive}与传统电影获得的该参数相关性较好,且无统计学差异,因而推测CS电影可以用于临床评估左心房EF_{passive}。尽管CS技术低估了左心房EF_{total}和EF_{booster},但依然能够检测出正常组和病患组左心房射血分数的差异。总的来说,CS电影可以评估左心房的收缩功能,特别是左心房被动收缩功能。

本研究尚存在一些不足。首先,本研究仅分析了左心房的3个时相,并未对左心房整个心动周期中的径线和容积进行系统评估;其次,左心房应变逐渐应用于临床,它能在左房容积未发生改变之前发现左室舒张功能受损^[17],但是本研究中并未涉及;最后,CS电影高估左心房最小容积的影响因素并未进一步探讨。

综上所述,与传统心脏电影成像相比,基于CS的心脏电影技术并未降低左心房的图像质量,它可用来分析左心房径线、容积参数及收缩功能,为临床评估左心房的变化提供可靠信息。

[参考文献]

[1] SUGIMOTO T, ROBINET S, DULGHERU R, et al. Echocardiographic reference ranges for normal left atrial func-

tion parameters: results from the EACVI NORRE study [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(6): 630-638

[2] BRECHT A, OERTELT-PRIGIONE S, SEELAND U, et al. Left atrial function in preclinical diastolic dysfunction: two-dimensional speckle-tracking echocardiography-derived results from the BEFRI trial [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2016, 29(8): 750-758

[3] 王辉,徐磊,贺毅,等.心脏磁共振评价心尖肥厚型心肌病患者左心房室结构、功能及其相关性研究[J]. *磁共振成像*, 2019, 10(6): 415-419

[4] LIN A C W, STRUGNELL W, RILEY R, et al. Higher resolution cine imaging with compressed sensing for accelerated clinical left ventricular evaluation [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 45(6): 1693-1699

[5] KIDO T, KIDO T, NAKAMURA M, et al. Compressed sensing real-time cine cardiovascular magnetic resonance: accurate assessment of left ventricular function in a single-breath-hold [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18(1): 50

[6] MACEIRA A M, COSIN-SALES J, ROUGHTON M, et al. Reference left atrial dimensions and volumes by steady state free precession cardiovascular magnetic resonance [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2010, 12(1): 65

[7] 朱蔚,饶莉.心脏影像技术在评价左心房及左心耳功能中的应用[J]. *心血管病学进展*, 2016, 37(5): 472-475

[8] 衡阳,陈峰,徐剑峰,等.基于压缩感知的心脏磁共振快速成像的应用现状与发展趋势[J]. *计算机科学*, 2019, 46(1): 36-44

[9] STEEDEN J A, KOWALIK G T, TANN O, et al. Real-time assessment of right and left ventricular volumes and function in children using high spatiotemporal resolution spiral bSSFP with compressed sensing [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20(1): 79

[10] KIDO T, KIDO T, NAKAMURA M, et al. Assessment of left ventricular function and mass on free-breathing compressed sensing real-time cine imaging [J]. *Circ J*, 2017, 81(10): 1463-1468

[11] DEN UIJL D W, CABANELAS N, BENITO E M, et al. Impact of left atrial volume, sphericity, and fibrosis on the outcome of catheter ablation for atrial fibrillation [J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2018, 29(5): 740-746

[12] 王军,徐怡,祝因苏,等.心脏CT左房参数在预测房颤患者卒中发生中的价值[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(1): 136-140

[13] TSANG T S, ABHAYARATNA W P, BARNES M E, et al. Prediction of cardiovascular outcomes with left atrial size:

(下转第273页)

ARIMA 乘积季节模型与指数平滑模型均以历史数据为基础,建模前提是数据的外延,若外界影响因素突然变化,或是有新变量引入,都会对模型预测效果造成大的影响,降低预测效能。因此这两个模型更加适用于时间序列的短期预测,对序列的更进一步预测,需要及时更新数据资料,添加新的实际值对模型进行修正,然后重新拟合预测。另外,影响肺结核发病的因素繁多,欲研究其他因素对肺结核发病序列的影响,可以考虑结合其他模型建立多因素模型共同分析。

【参考文献】

[1] KYU H H, MADDISON E R, HENRY N J, et al. The global burden of tuberculosis: results from the Global Burden of Disease Study 2015 [J]. *Lancet Infect Dis*, 2018, 18 (3):261-284

[2] World Health Organization. Global tuberculosis report 2018 [EB/OL]. [2019-08-12]. https://www.who.int/tb/publications/global_report/en/

[3] 王 华,包训迪,刘 双,等.线性探针技术快速检测肺结核耐药性临床研究[J]. *临床肺科杂志*, 2016, 21(5): 856-857

[4] 杨天池,洪 航,陈 同,等.人口流入城市肺结核流行特征、时空分布及其社会影响因素分析[J]. *中国人兽共患病学报*, 2017, 33(9): 800-804

[5] 王 超,丁 勇,陆 群,等. ARIMA 乘积季节模型在我国甲肝发病预测中的应用[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(1): 75-79

[6] 张文娟,刘文东,胡建利,等.基于 ARIMA 模型的江苏省梅毒疫情预测[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(5): 649-652

[7] 卞子龙,汤佳琪,倪春辉,等.应用 ARIMA-GRNN 组合模型分析江苏尘肺病发病情况[J]. *环境与职业医学*, 2019, 36(8): 755-760

[8] 王 燕.应用时间序列分析[M].北京:中国人民大学出版社,2016:196-201

[9] 单富强.流动人口结核病流行特征与管理现状[J]. *中国卫生产业*, 2018, 15(20): 182-183

[10] 朱奕奕,赵 琦,冯 玮,等.应用指数平滑法预测上海市甲型病毒性肝炎发病趋势[J]. *中国卫生统计*, 2013, 30(1): 31-33

[11] 潘姣姣,董柏青,吕 炜,等.三种时间序列模型探讨 1989~2012 广西肺结核发病趋势[J]. *中国卫生统计*, 2012, 29(6): 868-870

[12] 严 婧,杨北方.指数平滑法与 ARIMA 模型在湖北省丙型肝炎病毒感染发病预测中的应用[J]. *中国疫苗和免疫*, 2017, 23(3): 292-297

[13] 杨丽娟,段 禹,张燕杰,等.动态因子模型在安徽省乙类传染病发病情况分析中的应用[J]. *中国卫生统计*, 2017, 34(6): 853-856

[14] 张生奎,王镇德,杨 荔,等.基于 SARIMA-ERNN 组合模型预测我国细菌性痢疾发病率[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(6): 925-931

[15] 汪 鹏,彭 颖,杨小兵. ARIMA 模型与 Holt-Winters 指数平滑模型在武汉市流感样病例预测中的应用[J]. *现代预防医学*, 2018, 45(3): 385-389

【收稿日期】 2020-03-27

(上接第 257 页)

is volume superior to area or diameter?[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2006, 47(5): 1018-1023

[14] MA Y, HOU Y, MA Q, et al. Compressed SENSE single-breath-hold and free-breathing cine imaging for accelerated clinical evaluation of the left ventricle[J]. *Clin Radiol*, 2019, 74(4): 325 e329-325 e317

[15] SOHRABI S, HOPE M, SALONER D, et al. Left atrial transverse diameter on computed tomography angiography can accurately diagnose left atrial enlargement in patients with atrial fibrillation [J]. *J Thorac Imaging*, 2015, 30

(3): 214-217

[16] SHANG Y, ZHANG X, LENG W, et al. Left atrium passive ejection fraction is the most sensitive index of type 2 diabetes mellitus-related cardiac changes [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2018, 34(1): 141-151

[17] MORRIS D A, BELYAVSKIY E, ARAVIND-KUMAR R, et al. Potential usefulness and clinical relevance of adding left atrial strain to left atrial volume index in the detection of left ventricular diastolic dysfunction [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(10): 1405-1415

【收稿日期】 2020-10-30