

轮廓配准法在MRI评估健康成年人左心室心肌细胞外容积分数中的价值

周旭辉¹, 郑梅², 谢秋霞³, 林玲³

(中山大学1. 附属第八医院影像科, 广东深圳518033; 2. 附属第三医院放射科, 广东广州510630; 3. 附属第一医院放射科, 广东广州510080)

摘要:【目的】探讨轮廓配准法在MRI纵向弛豫时间定量成像(T1 mapping)技术评估健康成年人左心室心肌细胞外容积分数(ECV)中的价值。【方法】纳入26名健康志愿者(男16名,女10名),进行心脏MRI检查。采用改良的Look-Locker反转恢复(MOLLI)序列采集心底部、心室中部和心尖部三个短轴位对比增强前后的图像。利用后处理软件通过常规法和配准法分别生成心肌ECV图并比较图像质量。将每个短轴位层面的图像分为形变组和对照组,比较各层面及各组的常规ECV值和配准ECV值。【结果】16位志愿者(61.5%)的T1 mapping图像出现左心室形变。左心室3个短轴位配准ECV图像质量均比常规ECV图高。左心室总体、心室中部和心尖部的常规ECV值[(26.81±2.78)%、(25.38±3.05)%、(28.66±4.10)%]与配准ECV值[(25.75±2.42)%、(24.30±2.45)%、(27.22±3.38)%]均有统计学差异(*P*值分别为0.001、0.016、0.010)。三个形变组配准ECV值均低于常规ECV值(*P*值分别为0.038、0.012、0.016)且标准差较小。心尖部ECV值高于其他层面以及总体ECV值(常规:*F*=4.799, *P*=0.004;配准:*F*=4.822, *P*=0.003)且标准差较大。【结论】T1 mapping图像出现左心室形变时轮廓配准技术可改善ECV图像质量,提高ECV值定量精确度。

关键词: 心脏磁共振;纵向弛豫时间定量成像;细胞外容积分数;轮廓配准

中图分类号: R445.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3554(2018)01-0130-08

Contour-based Registration for Left Ventricular Myocardial Extracellular Volume Fraction Using T1 Mapping in Healthy Adults

ZHOU Xu-hui¹, ZHENG Mei², XIE Qiu-xia³, LIN Ling³

(1. Department of Diagnostic Radiology, the Eighth Affiliated Hospital of Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518033, China; 2. Department of Diagnostic Radiology, the Third Affiliated Hospital of Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510630, China; 3. Department of Diagnostic Radiology, the First Affiliated Hospital of Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510080, China)

Corresponding to: LIN Ling, Email: xiangxiang_87@163.com

Abstract: 【Objective】 We aimed to evaluate the role of contour-based registration in quantification of myocardial extracellular volume fraction (ECV) based on T1 mapping technique. 【Methods】 T1 mapping images of the basal, mid-cavity and apical short axis slices of 26 healthy volunteers (16 males and 10 females) were obtained before and after administration of contrast agent using Modified Look-Locker Inversion Recovery (MOLLI) on a 3.0T Magnetic Resonance Imaging system. ECV was calculated by routine method and registered method. For each slice, subjects were divided into the deformation subgroup and the control subgroup. Routine ECVs and registered ECVs were compared for each subgroup. 【Results】 Left ventricular deformation among T1 mapping images occurred in 16 subjects (61.5%). In all three slices, registered ECV maps had better image quality and more highest grade images than routine ECV maps. Routine ECVs

收稿日期: 2017-11-14

基金项目: 广东省科技计划项目(2013B021800136)

作者简介: 周旭辉, 医学博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 心血管影像诊断, E-mail: xiaolintongqq@126.com; 林玲, 通信作者, 医学硕士, 主治医师, E-mail: xiangxiang_87@163.com

[(26.81 ± 2.78)% , (25.38 ± 3.05)% , (28.66 ± 4.10)%] were statistically different from registered ECVs in global [(25.75 ± 2.42)% , $P=0.001$], mid-cavity [(24.30 ± 2.45)% , $P=0.016$] and apical slices [(27.22 ± 3.38)% , $P=0.010$]. In deformation subgroups of all the 3 slices, registered ECVs were lower than routine ECVs with smaller SDs ($P=0.038$, 0.012, 0.016). The apical ECVs were higher with larger SDs than the other two slices and the global ECVs (routine: $F=4.799$, $P=0.004$; registered: $F=4.822$, $P=0.003$). 【Conclusions】 Contour-based registration can improve the image quality and precision of ECV quantification in cases with ventricular shape deformation among source images.

Key words: cardiovascular magnetic resonance imaging; T1 mapping; extracellular volume fraction; contour-based registration

[J SUN Yat-sen Univ (Med Sci), 2018, 39(1): 130-137]

近年来,基于纵向弛豫时间定量成像(T1 mapping)技术的心肌细胞外容积分数(extracellular volume fraction, ECV)相关研究成为心脏MR领域的热点之一。心肌ECV是敏感性高、可重复性好的定量指标,有望成为多种疾病诊断和预后的生物标记物^[1]。但由于T1 mapping技术容易受多种技术因素和个体因素影响^[2],其临床应用仍然受限。自动运动校正(motion correction)和对比增强前后T1图像的自动配准技术可以提高ECV图像质量,但这种以信号差异为基础的全自动技术有一定局限性^[3]。轮廓配准技术可通过手工描画的心肌轮廓将对比增强前后所有T1 mapping图像进行非线性配准后再生成T1图,理论上有望进一步提高ECV图像质量。本研究采用运动校正后的T1 mapping图作为原始图像,旨在探讨轮廓配准法在MRI评估健康成年人左心室心肌细胞外容积分数中的临床价值。

1 材料与方 法

1.1 研究对象

本研究经伦理委员会审批通过(审批号:[2015]66)。所有参与者均签署知情同意书,并充分了解注射对比剂可能出现的相关不良反应。

本研究共纳入26名健康成年志愿者(年龄24~65岁,男性16人,女性10人)。纳入标准包括:①血压、血脂、血糖正常,肝功能、肾功能正常;②常规12导联心电图正常;③既往无心血管疾病、高血压、肾病、甲状腺疾病或其他严重系统性疾病。排除标准包括:①MR检查禁忌证,例如幽闭恐惧症、铁磁性金属植入物、人工起搏器置入等;②妊娠、哺乳期或正在备孕;③钆对比剂过敏;④临床资料不全或无法配合心脏MR检查。

1.2 仪器和材料

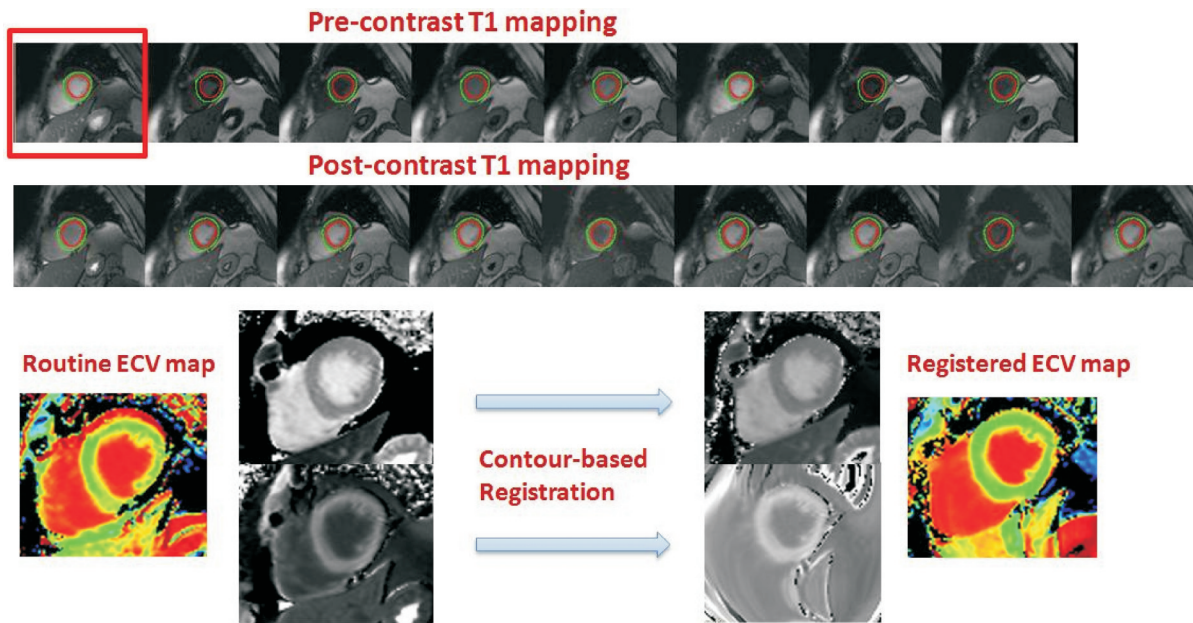
采用3.0T磁共振成像系统(SIEMENS, Magnetom Verio),8通道射频脉冲体线圈以及心电门控装置。扫描序列包括黑血序列、电影序列、对比增强前后T1 mapping序列以及延迟增强序列。

对比剂(Gd-DTPA,北陆,中国)用量为0.2 mmol/kg。注射对比剂前和注射后15分钟的T1 mapping扫描分别采用5(3)3方案^[4]和4(1)3(1)2方案^[5]的MOLLI序列。对比增强前后扫描层面相同,包括左心室三个短轴层面:心底部、心室中部和心尖部。扫描参数如下:TR=316 ms,TE=1.12 ms,翻转角35°,FOV=306 mm×360 mm,矩阵=218×256,层厚8 mm,带宽1085 Hz/Px,最小TI=120 ms,TI增量=80 ms,并行采集加速因子2。扫描结束时系统自动生成运动校正后的图像^[6](对比增强前为8幅图像,对比增强后9幅图像)以及T1图。本研究中这些T1图称作常规T1图。扫描中若发现屏气配合不佳或心电触发错误导致的明显伪影,则立即重新扫描。

1.3 图像后处理和分析

1.3.1 心功能测量采用后处理软件(德国西门子Argus)计算左心室功能相关参数。所有志愿者的心脏MR图像和心功能指标均由两名放射科医生分别阅片,并判断是否存在异常,以取得一致意见为准。

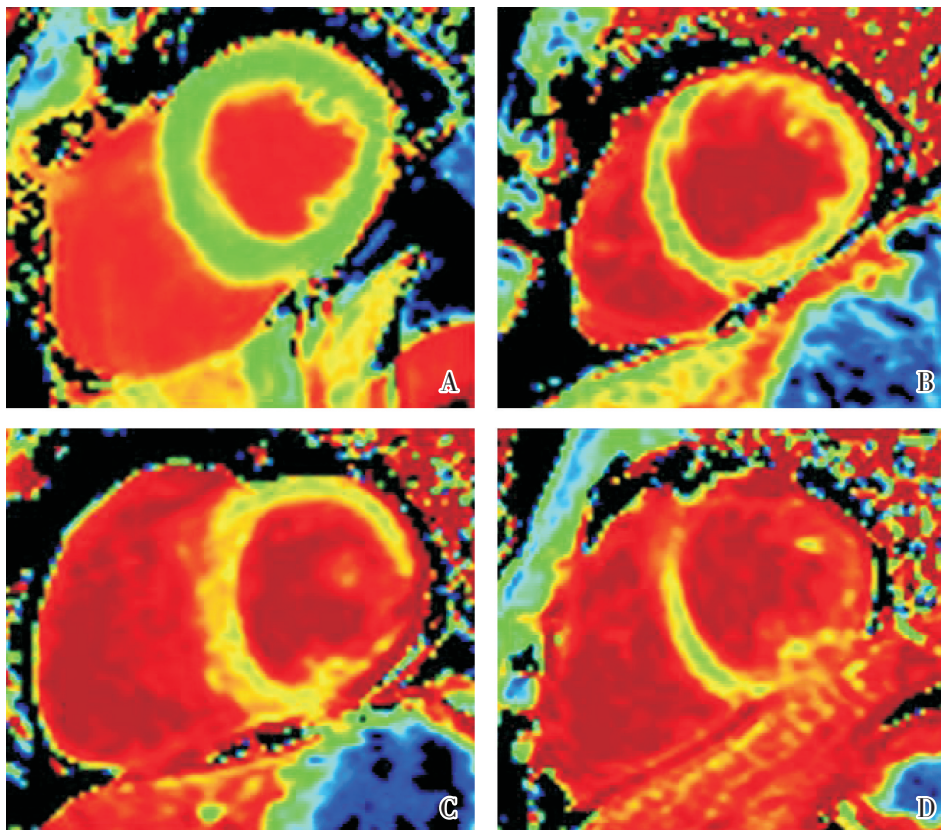
1.3.2 轮廓配准 将注射对比剂前后所有T1 mapping图像导入后处理软件(cvi42 v5.0, Circle Cardiovascular Imaging公司,加拿大),手工仔细描画每一幅运动校正后的T1 mapping图中左心室心肌内外轮廓,尽量避免心腔内血池的高信号。然后将所有图像与对比增强前的任一幅图像(通常选择第一幅)进行配准,之后分别生成对比增强前后的T1图。这些新生成的T1图即为配准T1图,可见左心室心肌周围的组织结构不同程度扭曲(图1)。



The epi- and endo-myocardial contours of each pre- and post-contrast motion-corrected T1-mapping image were carefully traced. Then all images were registered to one of the pre-contrast T1 mapping images, usually the first image, and registered T1 maps were generated with twisted structures surrounding the left ventricular myocardium

图1 轮廓配准的过程

Fig.1 The process of contour-based registration



A: Grade IV, excellent; B: Grade III, good; C: Grade II, fair; D: Grade I, poor.

图2 ECV图像质量分级

Fig.2 Grading of image quality of the ECV maps

1.3.3 ECV 的计算 描画对比增强前后 T1 图的心肌内外轮廓后可生成 ECV 图在左心室心腔内画 ROI, 避开乳头肌和肌小梁, 从而获得血池 T1 值。利用注射对比剂前后的心肌 T1 值以及血细胞容积, 根据以下公式由软件计算得到心肌 ECV 值^[7]:

$$\Delta R1_{\text{myo}} = 1/T1_{\text{myo-post}} - 1/T1_{\text{myo-pre}},$$

$$\Delta R1_{\text{blood}} = 1/T1_{\text{blood-post}} - 1/T1_{\text{blood-pre}},$$

$$\lambda = \Delta R1_{\text{myo}} / \Delta R1_{\text{blood}},$$

$ECV = \lambda \times (100 - HCT)$, 其中 ECV、 λ 和 HCT 均采用百分数形式。

1.3.4 评估轮廓配准的价值 首先对所有 ECV 图的图像质量分级 IV 级为优秀, 表现为心肌轮廓清晰、信号均匀且无伪影。III 级为良好, 表现为心肌轮廓稍模糊和/或有少许伪影。II 级为一般, 图像中可见明显伪影, 影响局部心肌 ECV 值。I 级为差, 图像中有严重伪影, 影响该层面一半以上心肌节段的 ECV 值(图 2)。

常规 ECV 值通过常规 T1 图计算, 配准 ECV 值则通过配准 T1 图计算。根据 AHA 分段法^[8], 左心室三个短轴层面可分为 16 段心肌。每一层面和每个节段的心肌 ECV 值均通过软件获得。为避免偏倚, 明显受伪影影响节段的心肌 ECV 值不纳入统计学分析。左心室总体 ECV 值为三个短轴层面心肌 ECV 的平均值。

为了探究轮廓配准的作用, 每个短轴层面所有志愿者均分两组: 对比增强前后 T1 图或不同反转时间的 T1 mapping 图像中左心室形状不完全相同的志愿者被归为形变组, 剩余无左心室形变的志愿者组成对照组, 对每个短轴层面形变组和对照组的常规 ECV 和配准 ECV 值进行比较。

1.4 统计学分析

统计学分析采用 SPSS 19.0 和 MedCalc 12.2 软件。随机选择 10 个志愿者, 一个月后由同一人重

新描画对比增强前后 T1 mapping 图像的心肌轮廓并计算各节段心肌 ECV 值, 采用 Bland-Altman 法分析观察者内一致性。配准前后 ECV 值的比较采用配对 *t* 检验。设定 $P < 0.05$ 为有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料及左心室功能

26 名志愿者的一般资料及左心室功能指标均在正常范围内(表 1)。所有志愿者 CMR 检查均无异常征象。Bland-Altman 检验提示两次测量的一致性良好, 两次 ECV 差值平均为 -0.32% (下限 -1.29%, 上限 0.65%)。

表 1 志愿者一般资料和左心室功能

Table 1 Demographic characteristics information and left ventricular function

| | Mean±SD |
|---|---------------------|
| Age/years | 46.1±10.6 |
| Height /cm | 167.0±8.5 |
| Weight/kg | 69.3±13.1 |
| BMI | 24.7±3.1 |
| BSA/m ² | 1.88±0.20 |
| Heart Rate/min | 69.1±7.7 |
| Blood pressure (Systolic/Diastolic)/mmHg | 118.2±13.1/73.4±9.5 |
| EDV/mL | 140.1±38.8 |
| ESV/mL | 55.5±22.8 |
| EF/% | 61.1±7.3 |
| CO/(L/min) | 5.83±1.73 |
| ED-MASS/g | 97.5±36.5 |
| ED-MASS/BSA | 54.5±21.8 |

2.2 轮廓配准的作用

常规 ECV 图和配准 ECV 图的图像质量分级

表 2 ECV 图像质量分级情况

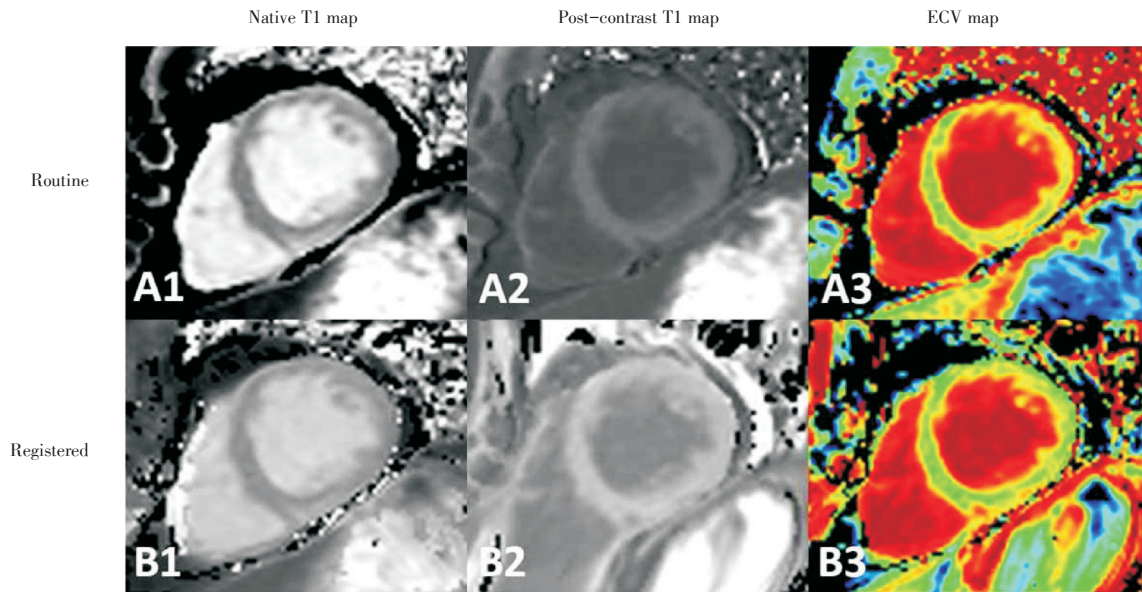
Table 2 Image grades of ECV maps

| Grade | Basal slice (n=25 ¹⁾) | | Mid-cavity slice (n=26) | | Apical slice (n=26) | |
|-------|-----------------------------------|--------------|-------------------------|--------------|---------------------|--------------|
| | Routine | Registered | Routine | Registered | Routine | Registered |
| IV | 44.0% (n=11) | 60.0% (n=15) | 38.5% (n=10) | 69.2% (n=18) | 15.4% (n=4) | 26.9% (n=7) |
| III | 40.0% (n=10) | 32.0% (n=8) | 46.2% (n=12) | 26.9% (n=7) | 38.5% (n=10) | 38.5% (n=10) |
| II | 8.0% (n=2) | 4.0% (n=1) | 11.5% (n=3) | 3.8% (n=1) | 42.3% (n=11) | 34.6% (n=9) |
| I | 8.0% (n=2) | 4.0% (n=1) | 3.8% (n=1) | 0% (n=0) | 3.8% (n=1) | 0% (n=0) |

¹⁾ECV map of one subject was failed to generate due to incorrect localization.

见表2。心底部、心室中部和心尖部配准 ECV 图像质量优良率(Ⅳ级+Ⅲ级)分别为92%、96.2%和65.4%,均高于常规 ECV 图像(分别为84%、84.7%和53.9%)。

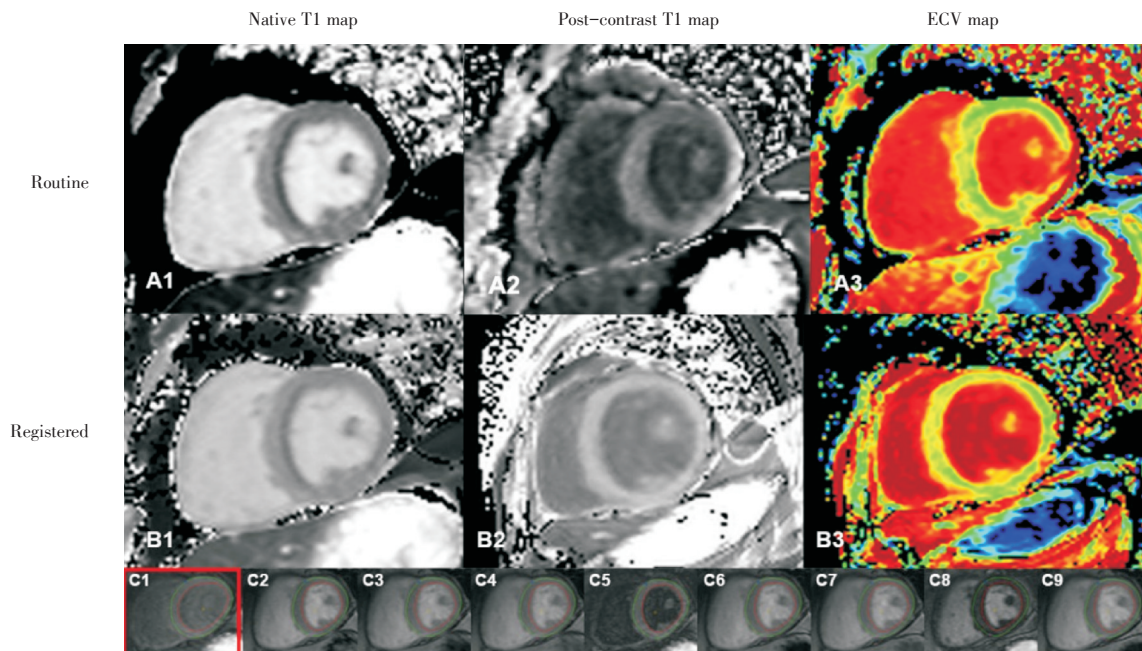
本组中16位志愿者(61.5%)至少一个层面的 T1 mapping 图像出现左心室形变,心底部、心室中部和心尖部形变率分别为44.0%(11/25)、42.3%(11/26)和57.7%(15/26)。分析过程中笔者观察



The blurred margin of the anterior wall (A3) caused by inconsistent ventricular shape between native and post-contrast T1 maps was improved after contour-based registration (B3).

图3 一名55岁女性志愿者左心室中部层面常规 T1/ECV 图(A1-A3)和配准 T1/ECV 图(B1-B3)

Fig.3 Routine (A1-A3) and registered (B1-B3) T1/ECV maps of the mid-cavity slice of one subject (a 55-year-old female)



The artifacts (A3) caused by inconsistent ventricular shape between native and post-contrast T1 maps were mitigated after contour-based registration (B3).

图4 一名41岁男性志愿者心室中部层面常规 T1/ECV 图(A1-A3)和配准 T1/ECV 图(B1-B3)

Fig.4 Routine (A1-A3) and registered (B1-B3) T1/ECV maps of the basal slice of one subject (a 55-year-old female)

到两种形变:一种是对比增强前后T1图中的左心室形状不一致(图3)。另一种则表现为T1 mapping序列中不同反转时间的一幅或多幅图像中出现左心室形状改变(图4)。

不同短轴层面左心室形变的情况及轮廓配准对ECV图像质量的影响见表3,结果显示轮廓配准能改善ECV图像质量,使心肌轮廓更加清晰,伪影减轻,心肌信号更均匀,部分层面ECV图像分级提高。

本研究中常规ECV图有49个心肌节段因有

明显伪影而被剔除,配准后ECV图有29个心肌节段因明显伪影被剔除。

表4显示左心室总体、心底部、心室中部以及心尖部层面常规ECV值均高于配准ECV值,除心底部外,差异均有统计学意义。

所有形变组中配准ECV均值均小于常规ECV均值,且标准差较小。对照组中配准ECV均值与常规ECV均值均无统计学差异(表5)。

对照组(无形变)配准ECV和常规ECV比较,图像质量无差异。

表3 不同短轴层面左心室形变的情况及轮廓配准对ECV图像质量的影响

Table 3 Detailed information of ventricular deformation and the changes of ECV maps brought by contour-based registration (n)

| Ventricular deformation(n) | Basal slice | | Mid-cavity slice | | Apical slice | |
|--|-------------|-------------|------------------|-------------|--------------|-------------|
| | Type I (4) | Type II (7) | Type I (4) | Type II (7) | Type I (7) | Type II (8) |
| Image quality improved | 3 | 6 | 3 | 6 | 7 | 4 |
| Image quality improved and grades elevated | 2 | 4 | 3 | 6 | 3 | 4 |

表4 常规ECV与配准ECV的配对t检验

Table 4 Paired-samples t test between routine ECV and registered ECV ($\bar{x} \pm s, \%$)

| | Routine | Registered | Paired t | P |
|------------|------------|------------|----------|------|
| Global | 26.81±2.78 | 25.75±2.42 | 3.89 | 0.00 |
| Basal | 26.24±2.72 | 25.56±2.70 | 1.86 | 0.08 |
| Mid-cavity | 25.38±3.05 | 24.30±2.45 | 2.58 | 0.02 |
| Apical | 28.66±4.10 | 27.22±3.38 | 2.79 | 0.01 |

表5 不同层面和分组中配准ECV与常规ECV的配对t检验

Table 5 Paired-samples t test between registered ECVs and routine ECVs in different groups and slices ($\bar{x} \pm s, \%$)

| group | ECV | Mean±SD (%) | Paired t | P | |
|-----------------------------|---------------------------|-------------|------------|-------|------|
| Basal (n=23 ¹⁾) | Deformation (n=11, 44.0%) | Routine | 26.71±2.61 | 2.39 | 0.04 |
| | | Registered | 25.15±1.75 | | |
| | Control (n=12) | Routine | 25.82±2.87 | -0.67 | 0.52 |
| | | Registered | 25.94±3.38 | | |
| Mid-cavity (n=26) | Deformation (n=11, 42.3%) | Routine | 26.81±3.12 | 3.05 | 0.01 |
| | | Registered | 24.35±2.27 | | |
| | Control (n=15) | Routine | 24.32±2.61 | 0.38 | 0.71 |
| | | Registered | 24.26±2.66 | | |
| Apical (n=26) | Deformation (n=15, 57.7%) | Routine | 29.72±4.48 | 2.74 | 0.02 |
| | | Registered | 27.46±3.61 | | |
| | Control (n=11) | Routine | 27.22±3.15 | 1.21 | 0.25 |
| | | Registered | 26.89±3.19 | | |

1) The basal ECV map of one subject was failed to generate due to incorrect localization; ECV values of another two basal routine ECV maps were excluded because of severe artifacts.

3 讨论

屏气深度不同、R-R间期变化或心律失常等原因可能导致对比增强前后的T1图和不同反转时间的T1 mapping图像中心肌轮廓不完全相同而出现形变。本组中16位志愿者(61.5%)至少一个层面的T1 mapping图像出现左心室形变,结果显示对心室形变的原始图像应用轮廓配准技术可改善ECV图像质量,提高ECV值定量精确度(标准差减小)。

3.1 轮廓配准的价值

本研究显示轮廓配准技术较运动校正和自动配准技术能进一步提高ECV图像质量。本研究中心底部、心室中部和心尖部配准ECV图像质量优良率(Ⅳ级+Ⅲ级)分别为92%、96.2%和65.4%,均高于常规ECV图像(分别为84%、84.7%和53.9%)。笔者注意到,部分层面配准后ECV图像质量级别未能提高,但心肌轮廓更清晰,心肌信号更均匀。轮廓配准后ECV值的标准差减小也符合上述观察所见。

本研究中所有志愿者常规12导联ECG均正常,且所有人屏气稳定,但16位志愿者(61.5%)至少一个层面的T1 mapping图像出现左心室形变,心底部、心室中部和心尖部形变率分别为44.0%(11/25)、42.3%(11/26)和57.7%(15/26)。一般认为心率快慢、屏气质量、是否有心律失常都是影响T1 mapping技术,致左心室形变的原因。根据笔者观察分析,部分志愿者T1 mapping扫描过程中R-R间期的改变是导致一幅或多幅不同反转时间图像中出现左心室层面内形变的主要原因。对比增强前后扫描时屏气深度不同,也可能导致注射对比前后T1图心肌轮廓不同。此外,偶然出现的心律失常,比如室性期前收缩,也可能导致左心室形变。

3.2 左心室正常ECV值的分析

本研究左心室总体心肌ECV值[常规ECV:(26.81 ± 2.78)%,配准ECV:(25.75 ± 2.42)%]与既往采用3.0T MRI评估正常志愿者心肌ECV值相似[Lee等^[9](27 ± 1)%,Neilan等^[10](28 ± 3)%,Kawel等^[11](29 ± 3)%]。

与短轴位心底部和心室中部相比,心尖部心肌厚度最薄,运动伪影最多,因此2011年的专家共识不推荐在临床实践中对心尖部层面ECV值进行定量分析^[2]。本研究中心尖部形变发生率(57.7%)最高,常规ECV和配准ECV图像质量优良率(Ⅳ级+Ⅲ级)分别为53.9%和65.4%,均较心底部和心室中部低,常规ECV和配准ECV值标准差更大,这一结果与李松南等^[12]的结果一致,进一步验证了专家共识。本研究结果显示心尖部常规ECV和配准ECV值均高于心底部和心室中部,与Neilan等^[10]研究不一致。笔者认为可能与本研究心底部和心室中部较好的图像质量和后处理方法使这两层ECV值更低有关。

本研究有几点局限性:①是样本量较小,主要是由于纳入标准较严格;②是没有检验观察者间一致性;③是由于本机构没有配备其他T1 mapping序列,例如shMOLLI、SASHA和SAPPHIRE,因此本研究无法评估心室形变在其他序列所得T1图像中的发生率以及轮廓配准的作用。

综上所述,当T1 mapping原始图像存在心室形变时,轮廓配准可提高T1/ECV图的图像质量和ECV值的精确度。以往采用T1 mapping技术评估心肌ECV时可能低估了层面内左心室形变及其对ECV值的影响。考虑到心脏运动和容积效应可能造成的影响,临床上评估心尖部心肌ECV改变时应谨慎。

参考文献:

[1] Schelbert EB, Messroghli DR. State of the art: Clinical applications of cardiac T1 mapping [J]. Radiology, 2016, 278(3): 658-676.

[2] Moon JC, Messroghli DR, Kellman P, et al. Myocardial T1 mapping and extracellular volume quantification: a society for cardiovascular magnetic resonance (SCMR) and CMR working group of the European society of cardiology consensus statement [J].

- J Cardiovasc Magn Reson, 2013, 15(9): 92-99.
- [3] Kellman P, Wilson JR, Xue H, et al. Extracellular volume fraction mapping in the myocardium, part 1: Evaluation of an automated method [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2012, 14(1): 63-69.
- [4] Messroghli DR, Greiser A, Fr? hlich M, et al. Optimization and validation of a fully-integrated pulse sequence for modified look-locker inversion-recovery (MOLLI) T1 mapping of the heart [J]. J Magn Reson Imaging, 2007, 26(4): 1081-1086.
- [5] Kellman P, Hansen MS. T1-mapping in the heart: Accuracy and precision [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2014, 16(1): 21-29.
- [6] Xue H, Shah S, Greiser A, et al. Motion correction for myocardial T1 mapping using image registration with synthetic image estimation [J]. Magn Reson Med, 2012, 67(6): 1644-1655.
- [7] Ugander M, Oki AJ, Hsu LY, et al. Extracellular volume imaging by magnetic resonance imaging provides insights into overt and sub-clinical myocardial pathology [J]. Eur Heart J, 2012, 33(10): 1268-1278.
- [8] Cerqueira MD, Weissman NJ, Dilsizian V, et al. Standardized myocardial segmentation and nomenclature for tomographic imaging of the heart: A statement for healthcare professionals from the cardiac imaging committee of the council on clinical cardiology of the american heart association [J]. Circulation, 2002, 105(9): 539-542.
- [9] Lee JJ, Liu S, Nacif MS, et al. Myocardial T1 and extracellular volume fraction mapping at 3 tesla [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2011, 13(9): 75-89.
- [10] Neilan TG, Coelho-Filho OR, Shah RV, et al. Myocardial extracellular volume fraction from T1 measurements in healthy volunteers and mice: relationship to aging and cardiac dimensions [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2013, 6(6): 672-683.
- [11] Kawel N, Nacif M, Zavodni A, et al. T1 mapping of the myocardium: Intra-individual assessment of post-contrast T1 time evolution and extracellular volume fraction at 3 T for Gd-DTPA and Gd-BOPTA [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2012, 14(9): 26-29.
- [12] 李松南, 赵蕾, 董建增, 等. 3.0 T MR测量正常人左心室心肌纵向弛豫时间和细胞外容积比率 [J]. 中华放射学杂志, 2016, 50(12): 929-934.
- Li SN, Zhao L, Dong JZ, et al. Reference values of left ventricle myocardial T1 mapping and extracellular volume fraction at 3.0 T in healthy adults [J]. Chin J Radiol, 2016, 50(12): 929-934.

(编辑 王晓鹰)