

· 胸部影像学 ·

磁共振 T_1 -mapping 及细胞外容积在肥厚型心肌病中的应用价值

林青, 王佳佳, 葛英辉

【摘要】 目的:分析肥厚型心肌病(HCM)患者心肌节段纵向弛豫时间定量成像(T_1 -mapping)及细胞外容积(ECV)的特点,探讨 T_1 -mapping 及 ECV 对 HCM 的应用价值。**方法:**前瞻性搜集行 3.0T 心脏 MRI 检查的 HCM 患者 56 例(HCM 组)及 30 例健康志愿者(正常对照组)。测量两组舒张末期最大左心室壁厚度、心肌质量、16 个心肌节段初始和增强后 T_1 -mapping 值,计算其 ECV 值,分别比较 HCM 组与正常对照组及 HCM 各亚组间相关参数的差异。**结果:**HCM 组 56 例患者共有 896 个节段,将其分为肥厚并强化节段 260 个(A 组)、肥厚未强化节段 145 个(B 组)、非肥厚并强化节段 15 个(C 组)、非肥厚未强化节段 476 个(D 组)。HCM 组舒张末期最大左心室壁厚度、心肌质量、初始 T_1 -mapping 值均高于正常对照组[两组分别为 (21.01 ± 4.42) mm 和 (8.41 ± 1.23) mm、 (235.49 ± 96.63) g 和 (110.01 ± 22.36) g、 (1260.21 ± 66.47) ms 和 (1195.28 ± 37.48) ms],差异均有统计学意义(P 值均 < 0.01)。C 组初始 T_1 -mapping 值及 ECV 值最高,增强后 T_1 -mapping 最低,A、B、C、D 四组间差异均具有统计学意义($P < 0.05$)。**结论:**心脏 MRI T_1 -mapping 值和 ECV 值可定量评估 HCM 的心肌组织学特征。

【关键词】 肥厚型心肌病; 磁共振成像; T_1 -mapping; 细胞外容积; 延迟强化

【中图分类号】 R542.2; R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2021)09-1095-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.09.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of magnetic resonance T_1 -mapping and extracellular volume in hypertrophic cardiomyopathy

LIN Qing, WANG Jia-jia, GE Ying-hui. Department of Radiology, Central China Fuwai Hospital, Zhengzhou 450000, China

【Abstract】 Objective: To investigate the characteristics of longitudinal relaxation time quantitative imaging (T_1 -mapping) and extracellular volume (ECV) in patients with hypertrophic cardiomyopathy (HCM). **Methods:** Fifty-six HCM patients and 30 healthy volunteers who underwent 3.0T cardiac MRI were prospectively collected. The maximum left ventricular wall thickness at end-diastole, myocardial mass, initial and post-contrast T_1 -mapping values, and the ECV values of 16 myocardial segments in the two groups were measured. The differences between HCM groups and normal control groups, and between HCM subgroups were compared. **Results:** The 56 patients in the HCM group had a total of 896 segments, which were divided into 260 hypertrophic and enhanced segments (group A), 145 hypertrophic and unenhanced segments (group B), 15 non-hypertrophic and enhanced segments (group C), and 476 non-hypertrophic and unenhanced segments (group D). The maximum end-diastolic left ventricular wall thickness, myocardial mass, and initial T_1 -mapping values were all higher in the HCM group than those in the normal control group (21.01 ± 4.42) mm vs. (8.41 ± 1.23) mm, (235.49 ± 96.63) g vs. (110.01 ± 22.36) g, and (1260.21 ± 66.47) ms vs. (1195.28 ± 37.48) ms, respectively, all $P < 0.01$. The initial T_1 -mapping and ECV values were the highest, and the post-contrast T_1 -mapping was the lowest in group C, and the differences between the four groups were statistically significant ($P < 0.05$). **Conclusion:** Cardiac MR T_1 -mapping and ECV values can quantitatively evaluate the myocardial histological features of HCM.

【Key words】 Hypertrophic cardiomyopathy; Magnetic resonance imaging; T_1 -mapping; Extra-

作者单位: 450000 郑州, 阜外华中心血管病医院放射科

作者简介: 林青(1986-)男, 河南人, 硕士研究生, 主管技师, 主要从事心血管磁共振研究工作。

通讯作者: 葛英辉, E-mail: cjr.geyinghui@vip.163.com

基金项目: 河南省医学科技攻关计划省部共建项目(2018020449); 河南省医学科技攻关计划联合共建项目(SB201901097)

cellular volume; Late gadolinium enhancement

近年来随着磁共振技术的发展,心脏磁共振功能成像技术越来越多地被运用于心肌病的诊断。心脏磁共振检查具有无创、无辐射、高空间分辨率等优势,是评价心功能的金标准^[1]。肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)发病率居心肌病第二位,是青少年心源性猝死的首要原因^[2]。早期病理学研究发现,心肌纤维化是 HCM 发展过程中独立于心肌肥厚的特征性病理改变,是引起室性心律失常、猝死的病理基础,与患者预后密切相关^[3-4]。磁共振延迟强化技术(late gadolinium enhancement, LGE)能够准确识别心肌瘢痕及纤维化,但在一些轻度或弥漫性心肌纤维化的 HCM 患者中,延迟强化往往境界不清,因此准确界定心肌纤维化程度较困难。心肌初始 T_1 -mapping 值、增强后 T_1 -mapping 值及细胞外容积(extracellular volume, ECV)值可以定量评估心肌纤维化及心肌瘢痕程度,尤其是弥漫性心肌纤维化程度,克服传统临床检查手段和 LGE 的局限性^[5]。国内有 HCM 初始 T_1 -mapping 值的相关研究,但关于增强后 T_1 -mapping 值及 ECV 值的研究较为少见。本研究通过评判 HCM 患者心肌初始 T_1 -mapping 值、增强后 T_1 -mapping 值及其对应的 ECV 值,以定量分析各心肌节段纤维化程度,为临床医生下一步治疗或进行预后评估提供参考。

材料与方法

1. 病例资料

前瞻性收集华中阜外医院放射科 2018 年 3 月—2019 年 6 月间行 3.0 T MRI 心脏检查的 HCM 患者 56 例(HCM 组),其中男 40 例,女 16 例,年龄 16~64 岁,平均(47 ± 13)岁;同时期扫描 30 例健康志愿者(正常对照组),其中男 20 例,女 10 例,年龄 21~61 岁,平均(43 ± 12)岁。HCM 患者入选标准为经临床及心脏 MRI 诊断,左心室壁舒张末期最大室壁厚度 ≥ 15 mm,或有明确家族史患者室壁厚度 ≥ 13 mm,同时排除能够引起室壁肥厚的其他心血管疾病或全身疾病(如高血压、主动脉瓣狭窄、心肌淀粉样变性等)。所有患者于检查当日抽血检测红细胞容积(hematocrit, Hct)。

2. 检查方法

MRI 检查采用 3.0 T MRI 扫描仪(Magnetom Skyra, Siemens Healthcare, Erlangen, Germany)及 18 通道体部线圈,心电触发及呼吸门控技术进行扫描。常规心脏电影:采用真实稳态自由进动快速(true fast imaging with steady precession, True FISP)序列进行

采集,回顾性心电门控,短轴位扫描 8~10 层,覆盖左心室,扫描层厚 8 mm,层间距 2 mm,视野 $340 \text{ mm} \times 340 \text{ mm}$,矩阵 208×166 ,TR 39.24 ms,TE 1.43 ms,翻转角 80° ,采集时相 25。初始 T_1 -mapping 序列:采用改良运动校正 Look-Locker 反转恢复(modified motion-correction Look-Locker inversion-recovery, MOLLI)技术,一次屏气完成扫描,单层采集时间为 10~14 s。采集与电影序列相对应的左心室短轴位基底段、中间段及心尖段图像。扫描参数:层厚 8 mm,TR 2.70 ms,TE 1.12 ms,翻转角 35° ,视野 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$,矩阵 256×144 ,TI 180 ms。延迟增强成像:采用高压注射器以 4.0 mL/s 流率静脉推注对比剂钆喷酸葡胺注射液(Germany Bayer Schering Pharma AG)0.1 mmol/kg,并用 25 mL 生理盐水冲洗,行短轴位心肌首过灌注成像,完成灌注后以 2.0 mL/s 流率追加注药 0.1 mmol/kg;10~15 min 后采用相位敏感反转恢复(phase sensitive inversion recovery, PSIR)序列行延迟增强扫描,采集与电影序列对应的左心室短轴及两腔心、四腔心图像,扫描参数:层厚 8 mm,视野 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$,回波间隙 5.2 ms,TE 1.96 ms,翻转角 20° ,TI 275~325 ms。增强后 T_1 -mapping 序列扫描参数:层厚 8 mm,TR 2.70 ms,TE 1.12 ms,翻转角 35° ,视野 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$,矩阵 256×144 ,TI 260 ms,尽量在首次注药后 15~20 min 内开始扫描。

3. 图像分析

按照美国心脏学会左室心肌标准分段法,选取除左室心尖部以外的 16 个左室节段进行分析。采用 Siemens Argus 软件分析左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、舒张末期体积(left ventricular end-diastolic volume, LVEDV)、收缩末期体积(left ventricular end-systolic volume, LVESV)和舒张末质量指数(left ventricular end-diastolic mass, LVMI),并测量舒张末期每个心肌节段的最大左心室壁厚度。将 HCM 中舒张末期最大左心室壁厚度 ≥ 15 mm 的心肌节段定义为肥厚心肌节段。LGE 图像分析由 2 位具有 5 年以上心脏 MRI 诊断经验的放射科医师采用盲法独立分析每个心肌节段 LGE 的分布情况,以 2 位医师意见一致为判定标准。当意见不一致时,由第 3 位医师协助分析。

在专用后处理软件(CVI 42 5.9.0)上进行初始 T_1 -mapping 及增强后 T_1 -mapping 的分析。由具有 5 年以上心脏 MRI 诊断经验的放射科医师依次选取左室基底段、中间段和心尖段 3 层初始 T_1 -mapping 图像及增强后对应的 T_1 -mapping 图像,勾画心内膜及

心外膜。心内膜尽量远离血池,心外膜尽量避开心包。勾画完成后,由软件再次校准及识别后自动计算出各节段初始 T_1 -mapping 值及增强后 T_1 -mapping 值,输入患者检查当日的抽血化验结果 Hct,利用软件计算出 ECV 值,计算公式如下^[6-7]: $ECV = (1 - \text{hematocrit}) \times (1/T_1\text{-myopost} - 1/T_1\text{-myonative}) / (1/T_1\text{-bloodpost} - 1/T_1\text{-bloodnative})$,其中 hematocrit 为血细胞比容, T_1 -myopost 为增强后心肌 T_1 -mapping 值, T_1 -myonative 为初始心肌 T_1 -mapping 值, T_1 -bloodpost 为增强后血液 T_1 -mapping 值, T_1 -bloodnative 为初始血液 T_1 -mapping 值。

4. 统计学分析

采用 SPSS 23.0 软件进行统计学分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验对计量资料进行正态性检验,符合正态分布者以均值±标准差表示,不符合正态分布者以中位数及四分位数表示;计数资料以分数、百分比表示。计量数据符合正态分布时,组间比较采用独立样本 t 检验;不符合正态分布时,组间比较采用 Mann-Whitney U 秩和检验;采用方差分析评估多组计量资料间的差异,且多个均数间的多重比较采用 Dunnett- t 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. HCM 组各节段延迟强化情况

HCM 组 56 例患者共有 896 个节段,其中肥厚节段 405 个,非肥厚节段 491 个。将 896 个节段分为肥厚并强化节段组 260 个(A 组)、肥厚未强化节段组 145 个(B 组)、非肥厚并强化节段组 15 个(C 组)和非肥厚未强化节段组 476 个(D 组)。对照组 30 例患者共有节段 480 个。

2. HCM 组与正常对照组的左心室参数比较

HCM 组的舒张末期最大左心室壁厚度、心肌质量、初始 T_1 -mapping 值均大于正常对照组[两组分别为 (21.01 ± 4.42) mm 和 (8.41 ± 1.23) mm、 (235.49 ± 96.63) g 和 (110.01 ± 22.36) g、 (1260.21 ± 66.47) ms 和 (1195.28 ± 37.48) ms],差

异均有统计学意义(P 值均 < 0.01);而 HCM 组与正常对照组的 LVEF、LVEDV、LVESV 相比,差异均无统计学意义(P 值均 > 0.05 ,表 1)。

表 1 HCM 组与正常对照组的左心室参数值比较

参数	HCM 组	正常组	t 值	P 值
LVEF	62.04±14.21	63.37±3.95	-0.51	0.61
LVEDV	131.59±34.61	127.23±19.15	0.64	0.52
LVESV	51.11±23.68	46.80±9.39	0.96	0.34
LVMl(g)	235.49±96.63	110.01±22.36	7.00	<0.01
心肌厚度(mm)	21.01±4.41	8.44±1.16	15.35	<0.01
初始 T_1 -mapping (ms)	1260.21±66.47	1195.28±37.48	4.97	<0.01

注:采用独立样本 t 检验进行两组计量资料间的比较。

3. HCM 组左心室各节段与对照组初始 T_1 -mapping 值、增强后 T_1 -mapping 值及 ECV 值的比较

HCM 中 A 组初始 T_1 -mapping 值为 (1336.61 ± 47.66) ms,ECV 值为 42.70 ± 7.88 (图 1),B 组初始 T_1 -mapping 值为 (1270.43 ± 37.81) ms,ECV 值为 34.45 ± 7.85 ,C 组初始 T_1 -mapping 值为 (1371.61 ± 38.63) ms,ECV 值为 48.47 ± 7.38 (图 2),D 组初始 T_1 -mapping 值为 (1204.35 ± 35.81) ms,ECV 值为 28.21 ± 6.83 。HCM 中 C 组初始 T_1 -mapping 值及 ECV 值最大(C 组 $>$ A 组 $>$ B 组 $>$ D 组),增强后 T_1 -mapping 最小(C 组 $<$ A 组 $<$ B 组 $<$ D 组),各组间差异均具有统计学意义(P 值均 < 0.05)。D 组初始 T_1 -mapping 值大于正常对照组(图 3),差异有统计学意义($P < 0.05$,表 2)。

讨 论

T_1 -mapping 技术又称纵向弛豫时间定量成像技术,基于反转或饱和脉冲序列采集,目前多采用 Messroghli 等^[8]提出的 MOLLI 序列。本研究应用的 MOLLI 序列是目前临床应用较多也较成熟的序列,MOLLI 序列的主要优势是采集固定时相的数据,缩短了扫描时间,测得的 T_1 -mapping 更加精确,并且可重复性高^[9]。初始 T_1 -mapping 虽然可以定量检测局限性及弥漫性纤维化,但同时也受到很多因素的干扰,如初始 T_1 -mapping 反映的心肌细胞和细胞外容积的混合信号,其敏感度仅为中度(60%)^[10]。增强后 T_1 -

表 2 各组间初始 T_1 -mapping 值、增强后 T_1 -mapping 值及 ECV 值比较

指标	A 组	B 组	C 组	D 组	正常对照组
节段数	260	145	15	476	480
初始 T_1 -mapping 值(ms)	1336.61±47.66	1270.43±37.81	1371.61±38.63	1212.30±37.33	1195.28±37.48
P	0.000**	0.000#	0.006*	0.000##	—
增强后 T_1 -mapping 值(ms)	465.98±43.04	527.70±35.79	434.96±44.31	576.83±25.84	—
P	0.000**	0.000#	0.007*	—	—
ECV 值	42.70±7.88	34.45±7.85	48.47±7.38	29.20±4.54	—
P	0.000**	0.000#	0.006*	—	—

注:A 组表示肥厚并强化节段组,B 组表示肥厚未强化节段组,C 组表示非肥厚并强化节段组,D 组表示非肥厚未强化节段组。*:A 组 vs B 组;#:B 组 vs D 组;* :C 组 vs A 组;##:D 组 vs 正常对照组。采用方差分析比较多组计量资料间的差异,且多个均数间的多重比较采用 Dunnett- t 检验。

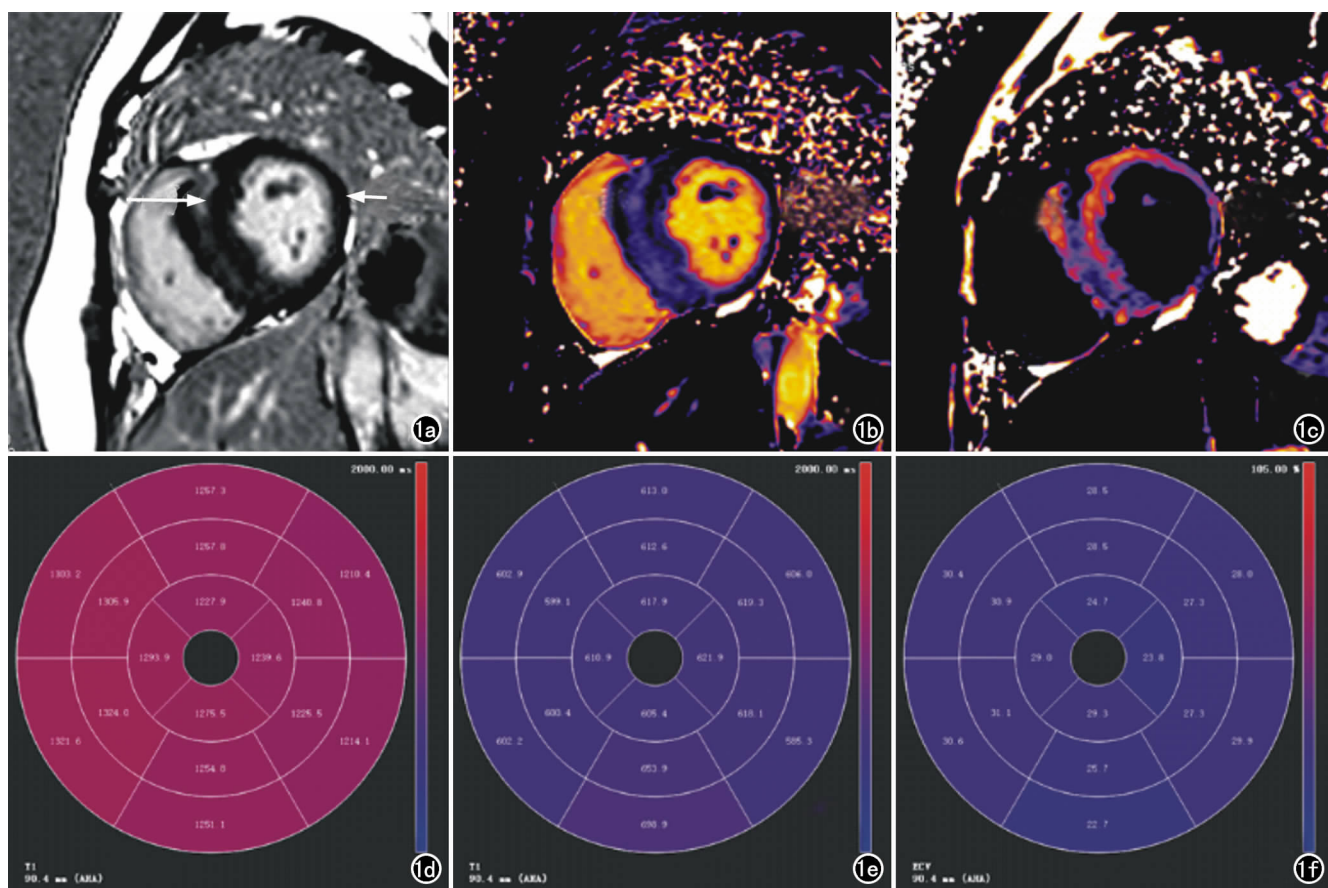


图 1 室间隔肥厚型心肌病患者,女,44 岁,阵发性胸闷气短 3 年余。a) 延迟强化图像示室间隔心肌肥厚,可见斑片状强化(长箭),侧壁心肌非肥厚未强化(短箭);b) 同一层面心肌初始 T_1 -mapping 图像;c) 同一层面增强后 T_1 -mapping 图像,室间隔初始 T_1 -mapping 值高于侧壁心肌(分别为 1314.9ms 和 1233.2ms),增强后 T_1 -mapping 值低于侧壁心肌(分别为 599.7ms 和 618.7ms);d) 左室心肌 16 节段初始 T_1 -mapping 值牛眼图;e) 增强后 T_1 -mapping 值牛眼图;f) ECV 值牛眼图。

mapping 使用钆对比剂可以明显缩短心肌组织的 T_1 弛豫时间,但增强后心肌 T_1 -mapping 值也会受增强扫描时间、对比剂注射流率及浓度等各种限制^[11]。ECV 基于增强前后心肌 T_1 -mapping 值的测量,并且使用血细胞比容的值进行校准,可有效避免这些干扰^[12],更准确地反映纤维化的程度及范围。本研究对比了增强前后心肌 T_1 -mapping 值,发现初始 T_1 -mapping 值越高,增强后 T_1 -mapping 值降低越多,这种现象可能与心肌纤维化的严重程度有关,当心肌瘢痕或纤维化越重时,细胞外组织间隙越大,心肌组织的初始 T_1 -mapping 值越高;增强后,细胞外间隙越大,钆对比剂囤积越多,其 T_1 -mapping 值降低越多,ECV 越高^[13]。ECV 可以量化心肌梗死、弥漫性纤维化及心肌淀粉样变性等心脏疾病导致的心肌局限性及弥漫性纤维化程度^[14-15]。

HCM 异常的心肌肥厚、瘢痕组织形成、肌细胞紊乱和间质弥漫性纤维化是 HCM 的组织病理学特征。HCM 中的心肌纤维化多发生于肥厚心肌内,通常位

于右室壁与室间隔的连接部,其范围大小与局部心肌肥厚程度呈正相关^[16]。本研究中,延迟强化节段多发生在肥厚节段,仅有极少节段为非肥厚节段。非肥厚节段的延迟强化多出现在终末期 HCM 患者中^[17-18],随着 HCM 的进展,出现室壁变薄、心腔扩大、左心室收缩功能障碍、心肌纤维化程度增加,延迟强化多表现为透壁强化。本研究发现肥厚并强化节段的初始 T_1 -mapping 值及 ECV 值高于肥厚未强化节段和非肥厚未强化节段,说明初始 T_1 -mapping、ECV 与 LGE 相比,在发现 HCM 患者心肌纤维化方面具有更高的敏感度。Maron 等^[19]的研究结果显示,LGE 强化部位与病理显示的纤维化区域具有很好的相关性,HCM 最常累及部位为室间隔非对称性肥厚,本研究中 LGE 最常见于基底段前间隔及下间隔、中间段前间隔及下间隔,此节段的 T_1 -mapping 值及 ECV 值也高于其他节段,与刘洪等^[20]的研究结果类似,HCM 组中心肌厚度正常且无延迟强化的节段 T_1 -mapping 值为 $(1212.35 \pm 37.33)\text{ms}$,略高于正常对照组 T_1 -mapping

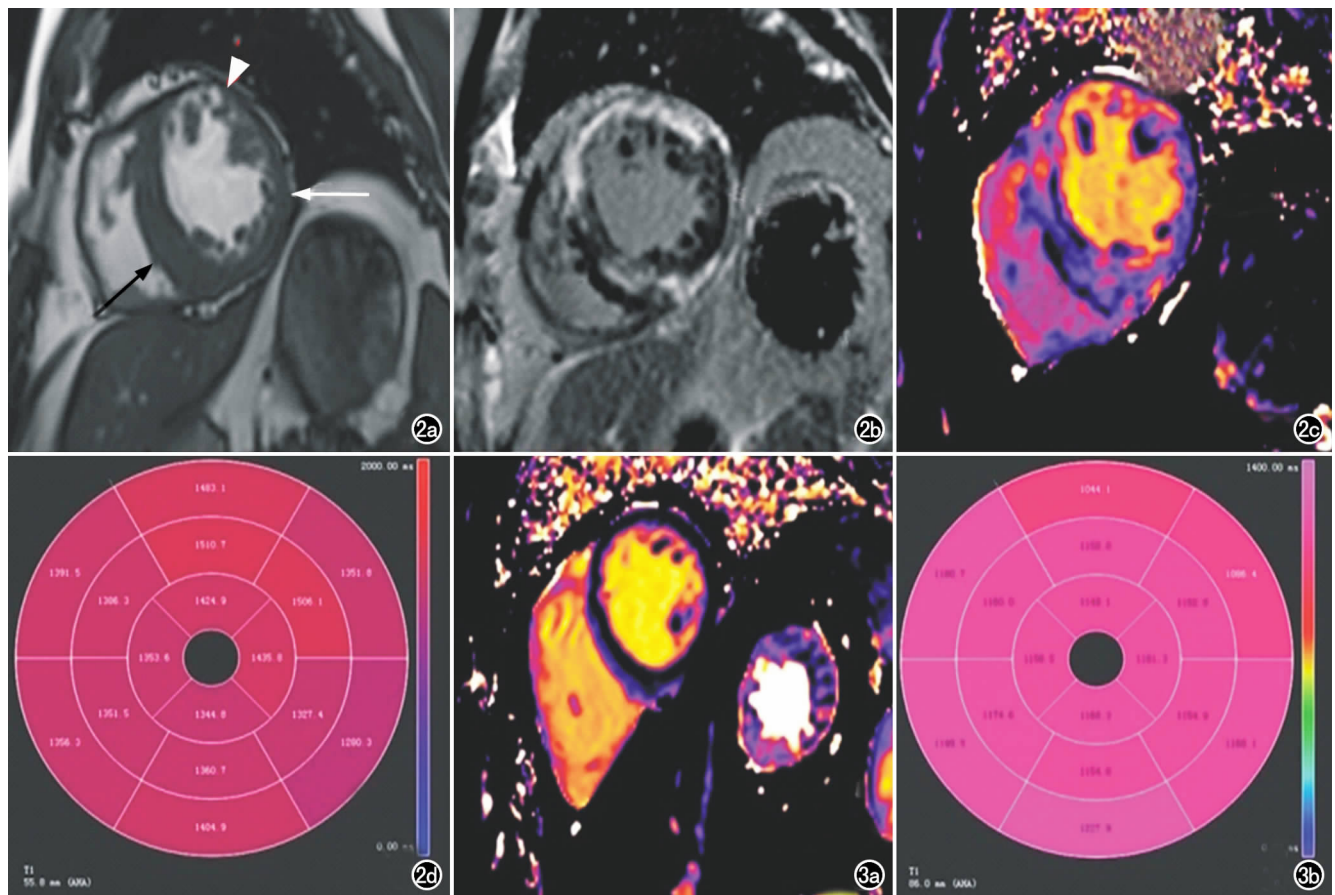


图2 终末期 HCM 患者,男,56 岁,确诊 HCM 25 年,冠脉 CTA 未见明显狭窄,LVEF 为 38%。a) 电影图像示室间隔心肌肥厚(黑箭),前壁心肌变薄(箭头),侧壁心肌未见肥厚(白箭);b) LGE 图像,室间隔可见条片状强化,前壁心肌可见透壁样强化,侧壁心肌未见明显强化;c) 心肌初始 T_1 -mapping 图像;d) 患者初始 T_1 -mapping 牛眼图。图3 健康志愿者,男,39 岁。图2 患者的前壁心肌初始 T_1 -mapping 值高于室间隔(分别为 1508.4 ms 和 1334.9 ms),图2 患者的侧壁心肌初始 T_1 -mapping 值高于图3 健康志愿者(分别为 1327.4ms 和 1186.3ms)。a)健康志愿者心肌初始 T_1 -mapping 图像;b)健康志愿者心肌初始 T_1 -mapping 牛眼图。

值的(1195.28 ± 37.48) ms,对应的 ECV 值(28.21 ± 6.83)也略高于 Neilan 等^[21]既往采用 3.0T MRI 评估正常志愿者的心肌 ECV 值(27 ± 1),说明在 HCM 中,心肌纤维化是发生于肥厚之前的,并且 T_1 -mapping 及 ECV 可以在 LGE 发生之前就可定量评估 HCM 心肌各节段心肌纤维化情况,因此其对于早期 HCM 的诊断价值优于 LGE-MRI。

本研究存在以下局限性:①未讨论肥厚程度与 T_1 -mapping 及 ECV 之间的关系;②正常对照组未行增强扫描,无增强后 T_1 -mapping 值及 ECV 值;③未对纤维化程度与心功能的变化、临床表现及预后进行评价。

综上所述, T_1 -mapping 值及 ECV 值可以早期识别 HCM 心肌纤维化,并可进行定量评估和用于疾病活动的分级、监测进展,为临床指导下一步治疗提供参考。下阶段我们将监测 T_1 -mapping 值及 ECV 随时

间的变化趋势,从而有助于了解心肌疾病进展至心力衰竭过程中心肌纤维化的作用。

参考文献:

- [1] Hundley WG, Bluemke DA, Finn JP, et al. ACCF/ACR/AHA/ NASCI/SCMR 2010 Expert consensus document on cardiovascular magnetic resonance: A report of the American College of Cardiology Foundation Task Force on Expert Consensus Documents [J]. J Am Coll Cardiol, 2010, 55(23): 2614-2662.
- [2] Maron BJ. Hypertrophic cardiomyopathy: a systematic review[J]. JAMA, 2002, 287(10): 1308-1320.
- [3] O'Hanlon R, Grasso A, Roughton M, et al. Prognostic significance of myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy[J]. J Am Coll Cardiol, 2010, 56(11): 867-874.
- [4] Green JJ, Berger JS, Kramer CM, et al. Prognostic value of late gadolinium enhancement in clinical outcomes for hypertrophic cardiomyopathy[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2012, 5(4): 370-377.
- [5] 崔辰, 赵世华. MRI 识别肥厚型心肌病心肌纤维化的临床意义及技术进展[J]. 中华放射学杂志, 2015, 49(12): 963-965.

- [6] Shang YN, Zhang XC, Zhou XY, et al. Extracellular volume fraction measurements derived from the longitudinal relaxation of blood-based synthetic hematocrit may lead to clinical errors in 3T cardiovascular magnetic resonance[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2018, 20(1):56.
- [7] Engblom H, Kanski M, Kopic S, et al. Importance of standardizing timing of hematocrit measurement when using cardiovascular magnetic resonance to calculate myocardial extracellular volume (ECV) based on pre-and post-contrast T₁-mapping[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2018, 20(1):46.
- [8] Messroghli DR, Greiser A, Frhlich 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.
- [9] Lee SP, Lee W, Lee JM, et al. Assessment of diffuse myocardial fibrosis by using MR imaging in asymptomatic patients with aortic stenosis[J]. Radiology, 2015, 274(2):359-369.
- [10] Perea RJ, Ortiz-Perez JT, Sole M, et al. T₁-mapping; characterisation of myocardial interstitial space [J]. Insights Imaging, 2015, 6(2):189-202.
- [11] 陈钢钢, 曾蒙苏. 心肌纵向弛豫时间和细胞外容积定量 MR 成像[J]. 放射学实践, 2016, 31(8):794-798.
- [12] De Haas HJ, Arbustini E, Fuster V, et al. Molecular imaging of the cardiac extracellular matrix[J]. Circ Res, 2014, 114(5):903-915.
- [13] Everett RJ, Stirrat CG, Semple SI, et al. Assessment of myocardial fibrosis with T₁-mapping MRI[J]. Clin Radiol, 2016, 71(8):768-778.
- [14] Kellman P, Wilson JR, Xue H, et al. Extracellular volume fraction mapping in the myocardium, part 2: initial clinical experience [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2012, 11(1):64.
- [15] 殷亮, 喻思思, 龚良庚. 磁共振 T₁-mapping 在心脏疾病中的应用[J]. 放射学实践, 2016, 31(6):546-549.
- [16] Pujadas S, Carreras FJ, Arrastio X, et al. Detection and quantification of myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy by contrast-enhanced cardiovascular magnetic resonance[J]. Rev Esp Cardiol, 2007, 60(1):10-14.
- [17] 李品睿, 李晓连, 许菲, 等. 肥厚型心肌病扩张相的临床特点及预后分析[J]. 中华心血管病杂志, 2016, 44(4):327-330.
- [18] 喻诗琴, 赵世华. 磁共振成像在肥厚型心肌病诊断中的应用[J]. 中华心血管病杂志, 2019, 47(6):508-512.
- [19] Maron MS. Clinical utility of cardiovascular magnetic resonance in hypertrophic cardiomyopathy[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2012, 14(1):13.
- [20] 刘洪, 余建群, 彭礼清. 磁共振延迟强化在肥厚型心肌病中的临床应用价值研究[J]. 放射学实践, 2017, 32(12):1271-1276.
- [21] 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.

(收稿日期:2020-09-15 修回日期:2021-04-30)