

慢性肾脏病的CMR评估及研究进展

王国辉, 孟 莉*

青海大学附属医院影像中心, 青海 西宁

收稿日期: 2023年6月21日; 录用日期: 2023年7月16日; 发布日期: 2023年7月25日

摘 要

慢性肾病(chronic kidney disease, CKD)患者早期虽然无明显临床症状, 但是对心血管系统的损伤已经开始发挥作用, 心肌纤维化是CKD进展的主要不良后果之一。本文就心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance, CMR)在CKD的心脏形态结构和功能、心肌应变及心肌组织特征评估方面的相关应用研究进展进行综述, 旨在为早期发现CKD患者心肌损害及心功能障碍提供有价值的信息, 为临床早期诊断及治疗提供影像学依据。

关键词

心脏磁共振, 慢性肾脏病, T1 Mapping, 弥漫性心肌纤维化

CMR Evaluation and Research Progress of Chronic Kidney Disease

Guohui Wang, Li Meng*

Image Center, Affiliated Hospital of Qinghai University, Xining Qinghai

Received: Jun. 21st, 2023; accepted: Jul. 16th, 2023; published: Jul. 25th, 2023

Abstract

Although patients with chronic kidney disease (CKD) have no obvious clinical symptoms in the early stage, the damage to the cardiovascular system has begun to play a role, and myocardial fibrosis is one of the main adverse consequences of the progress of CKD. This article reviews the progress in the application of cardiac magnetic resonance in the evaluation of cardiac morphology, structure and function, myocardial strain and myocardial tissue characteristics of CKD, in order to provide valuable information for early detection of myocardial damage and cardiac dysfunction in patients with CKD, and to provide imaging basis for early clinical diagnosis and treatment.

*通讯作者。

Keywords

Cardiac Magnetic Resonance, Chronic Kidney Disease, T1 Mapping, Diffuse Myocardial Fibrosis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

慢性肾脏病(chronic kidney disease, CKD)是肾脏功能的不可逆性丧失并发展为肾衰竭,最终形成尿毒症的一类慢性疾病。目前的定义为:各种原因引起肾脏损伤或功能异常 ≥ 3 个月,包括出现肾脏损伤标志(白蛋白尿、尿沉渣异常、组织学检查异常级影像学检查异常)或有肾移植病史,伴或不伴肾小球滤过率(glomerular filtration rate, GFR)下降,或不明原因的 GFR 下降(<60 ml/min) ≥ 3 个月,凡具备上述两条标准中的任何一条可诊断为 CKD [1]。最近一项研究[2]报告了全球 1~5 期 CKD 的患病率为 13.4%, 3~5 期 CKD 的患病率为 10.6%, 并呈逐年上升趋势,已成为全球加重人群健康负担的疾病之一,全球疾病负担(GBD)研究表明,CKD 已成为全球死亡的主要原因。CKD 的主要转归为肾功能衰竭、终末期肾病。GFR 在 60~75 ml/min/1.73m² 之间时,CKD 患者心血管风险已经缓慢、逐渐增加并且跟 GFR 下降的程度成正比[3]。CV 本质上与心脏结构和功能异常有关,这些异常在 CKD 早期就开始发展。包括左心室肥厚(LVH)、心室扩张、心功能障碍和心肌纤维化,这些有时被称为“尿毒症心肌病” [3]。心肌纤维化是进行性 CKD 的主要不良后果之一,可导致再入性心律失常和长期心肌功能障碍,在终末期肾病中易导致猝死和/或充血性心力衰竭[4]。Charytan 等[5]研究发现与肾功能正常的患者相比,在 3~4 期 CKD 和 5 期患者中,心肌纤维化程度分别增加了 12% 和 77%。

因此,在早期阶段发现并最终逆转这些心脏异常是改善 CKD 患者发病率和死亡率的一个重要目标。近年来,利用心脏磁共振(CMR)成像来检测这些异常已经成为一个发展的领域,CMR 作为一种调查工具在这个患者群体中得到了重视。本文就 CMR 在 CKD 的心脏形态结构和功能、心肌应变及心肌组织特征评估方面的相关应用研究进展进行综述。

2. 心脏结构、功能的评估

心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance, CMR)具有良好大的血池 - 心肌对比度及出色的时间和空间分辨率,全方位及多角度成像能够显示心脏功能和形态,具有多参数、多序列特征,并且一次扫描即可获得心房和心室的结构和功能参数[6] [7],其采用的自由稳态进动(SSFP)电影成像技术的高信噪比允许精确量化腔室大小和功能,它的速度编码,使用相位对比法,可以量化血流;其独特的组织表征能力允许识别纤维化、脂肪、铁、水肿和其他增加细胞外体积的浸润过程,独特地将功能与病理结合起来,已成为评价心肌结构和功能的金标准。与超声心动图相比,CMR 具有更高的准确性和精密度。在 CKD 人群中,CMR 也比超声心动图具有更低的观察者间变异,因此比较适合于临床研究。

然而,尽管增加左心室质量通常被认为是全因死亡率的替代终点,Badvé 等[8]对 6732 例 CKD 患者进行的一项 meta 分析表明,没有明确的证据表明左心室质量的变化与死亡率之间存在关联。

3. 心肌应变的评估

心肌应变成像已被证明可用于各种心脏病的识别和风险分层[9]。在某些情况下,其下降先于左室射

血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF) [10], 这表明它有望成为早期诊断的辅助工具。目前, 超声心动图、心脏计算机断层扫描和 CMR 是最常用的应变评估成像技术。然而, 由于超声心动图声学窗差, 是基于单心循环应变分析等缺点, 阻碍了其广泛的适用性。相比之下, CMR-FT 是一种基于后处理的方法, 允许从临床上用于心脏功能分析的标准稳态自由进动(SSFP)电影图像中量化应变参数[11]。鉴于 CMR-FT 不需要额外的成像序列并且后处理时间短, 它现在被认为是心肌变形评估的首选技术[11]。CMR-FT 能够准确评估心室和心房的应变, 在以往的许多研究中, 表现出良好的重现性[12] [13]。

心肌应变是两个给定点之间长度变化的无量纲指标, 反映了心肌变形的程度。其定义公式如下: 应变 = $(L1 - L0)/L0$, 其中 $L0$ 和 $L1$ 分别代表基线(通常为舒张末期)和所考虑的时间间隔结束时(通常在收缩末期)的心肌长度[14]。负应变意味着缩短、变薄和/或收缩, 而正应变意味着延长、增厚和/或松弛。根据心肌变形的不同方向, 可以计算出纵向、周向和径向应变。纵向应变表示从基部到顶点的纵向缩短, 用负值表示; 径向应变是指心肌向左室腔中心方向的径向变形, 表示在心动周期内左室增厚减薄运动, 它用正值表示; 周向应变是由左室心肌纤维在短视图下沿圆周缩短而产生的, 因此用负值表示; 应变率(SR)表示这些变形发生的速率[11]。全局纵向应变(GLS)主要来源于 CMR 电影的 4 (或 2, 3)腔室视图, 而全局圆周应变(GCS)和全局径向应变(GRS)主要来源于短轴[15]。LA 的主要作用是通过三个基本功能来调节左室充盈和心血管功能: 储存功能、导管功能及收缩功能[16]。因此, CMR-FT 通过 strain 和 SR 精确量化心房生理的三个基本方面, 分别称为被动应变、主动应变和总应变[17]。

Krishnasamy 等[18]研究发现, 在 CKD 4~5 期患者中, 与常规使用的射血分数相比, GLS 是一个更敏感的预测总死亡率和 CV 死亡率的指标。周玉祥等[19]研究发现虽 CKD 患者 LVEF 在正常范围, 但是 CKD 四期患者 GRS、GCS、GLS 均出现异常, 提示慢性肾病可改变心肌的顺应性。

4. 心肌组织特征的评估

4.1. 延迟钆增强成像

CMR 钆对比剂延迟强化(late gadolinium enhancement, LGE)是一种代表性的定性描述心肌特征的技术, 其使用 T1 加权反转恢复梯度回波(inversion recovery gradient echo, IR-GRE)序列, 目前最常用的为相位敏感反转恢复(phase sensitive inversion recovery, PSIR)梯度回波序列, 且将顺磁性的钆螯合剂作为对比剂。原理为: 损伤或患病的心肌致使细胞外间隙异常增大, 钆剂在异常增大的细胞外间隙积累, 形成正常心肌和局灶性损伤的心肌之间的分布差异; 顺磁性的钆剂可缩短 T1 弛豫时间, 形成正常心肌和局灶性损伤的心肌之间的 T1 弛豫时间的差异; 因此, 正常心肌和局灶性损伤的心肌之间的信号强度差异便可以显现出来, 局灶性损伤的心肌由于 T1 弛豫时间的缩短而表现为高信号, 即 LGE 图像上呈现的特征性强化方式, 从而使得各种局灶性心肌疾病的发现成为可能[20] [21] [22]。但是, LGE 仍存在一些不足。首先, LGE 可以准确识别局灶性纤维化, 而对于弥漫性病变(如弥漫性纤维化)对于钆剂的摄取是均一的, 则其在定性图像上会被漏诊[23]。

在没有心血管疾病临床证据的早期 CKD 患者(2~3 期)中, LGE 仅在 6% 的病例中被观察到, Charytan 等[5]研究发现, 在 5 期 CKD 组中 LVH 发生率为 72%, 而 LGE 的发生率高达 28%。在一项横断面研究中, 28% 的 ESRD 患者有 Gd 晚期增强(LGE)的证据, 72% 的 CMR 显示 LVH [24]。1/2 的患者(总数的 14%) 出现提示心肌梗死的分散心内膜下 LGE, 这种 LGE 的出现与缺血性心脏病和传统心血管危险因素病史有关。其他出现 LGE 的患者具有弥漫性心肌壁中层瘢痕形成, 这些患者没有冠状动脉粥样硬化的危险因素, 但却具有更高的左心室质量和更严重的左心室收缩功能障碍[24]。早期 CKD 患者中 LGE 的出现率并不清楚, 但是 LGE 似乎并不常见。在一项有关 100 例无心血管疾病且具有低水平危险因素的 2 到 3 期 CKD 患者的横断面研究中, 只有 6% 的患者出现心室壁中层弥漫性 LGE, 1% 的患者出现与既往静息性心

心肌梗死相一致的心内膜下强化。不同于 ESRD 患者的 LGE 研究, 这些患者具有正常的左心室质量, 但是血管炎性疾病患者的主导提示炎症在此过程中可能是重要的[25]。

但是, 根据欧洲药品管理局(European Medicines Agency)指南, 严重肾功能损害($eGFR \leq 30$ ml/min/1.73m²)患者禁用高危钆药物, 严重肾功能损害患者禁用中、低 NSF 风险钆药物, 这致使 LGE 技术在晚期 CKD 患者中使用受到了限制。

4.2. T1 Mapping

T1 mapping 技术应用是基于运动校正、优化、改进的 Look-Locker 反转恢复序列, 在扫描时, 质子主要来自水和脂肪, 其方向与主磁场平行或者反向平行, 从而形成与主磁场对其的净纵向磁化强度。这种平衡磁化强度会受到成像器件使用的射频(RF)脉冲的干扰, 在 RF 脉冲之后, 纵向磁化强度将以指数形式恢复到平衡状态, 其恢复时间常数表示为 T1。T1 恢复时间的变化依赖于质子的局部生化和分子环境, 因此可以用于表征组织组成的变化。最后得到的结果是一幅定量的图像, 其中每个像素的颜色代表了体素内的平均 T1 弛豫时间。所有组织都有其固有 T1(纵向或自旋点阵)弛豫时间, 这种弛豫时间是建立在这些组织的细胞和间隙各种成分的构成基础之上的(例如水, 蛋白质, 脂肪和铁含量)。在一个固定的磁场强度以及缺少外源性对比剂(例如钆剂螯合物)的情况下, 正常组织的平扫 T1 值属于一个可预测的范围。Mapping 序列使用不同的技术来得到一系列在不同反转时间的图像, 从这些反转图像中产生一条 T1 恢复曲线。结果便得到一幅 T1 图, 这是一种参数化的图像, 它通过一个接一个像素显示 T1 弛豫时间。这些图通常是彩色的, 从而有助于目测解读[26]。不同的组织有其各自的正常参考范围, 而偏离正常范围的显著差异被认为是区分正常心肌与异常心肌的标志。

有研究[19]发现, 相比于健康志愿者, CKD 二期患者的第 2、13 节段的初始 T1 值升高, 且随着病情进一步发展, 增高幅度及节段数显著增加。

4.3. ECV

ECV 可以提供重要的与心脏病的患病率和致死率相关的预后信息[27] [28]。结合平扫和对比增强 T1 mapping 可以评估血池与心肌中钆剂的比例, 连同红细胞比容, 可以定量评价细胞外(小间隙和细胞外基质)间隙容积在心肌组织所占的比例。增高的 ECV 是一种心肌重构的标志, 并且最常见是由于胶原蛋白过度沉积(在淀粉样蛋白缺乏或者是水肿)。有研究显示, ECV 可以提示脆弱的心肌对于缺血的耐受性下降[27] [28]。在 Wong 等[28]研究发现, II 型糖尿病患者的平均 ECV 值相比于无糖尿病患者更高(分别为 30.2%比 28.1%), 并且报道患者死亡的风险或因心衰入院治疗的几率随着 ECV 的增长而增长。ECV 定量可以用于在其余表现正常的心脏 MR 成像研究中鉴别及描绘弥漫性纤维化或细微的心肌异常。此外, ECV 测量值在不同的生产商和不同的采集技术间具有更高的可重复性。ECV 的计算公式为: $ECV = [\lambda * (1 - Hct)]$ 。Hct 代表扫描实时采集的静脉血样中检测的红细胞比容, λ 代表 $(1/\text{心肌增强 T1 弛豫时间} - 1/\text{心肌平扫 T1 弛豫时间}) / (1/\text{血池增强 T1 弛豫时间} - 1/\text{血池平扫 T1 弛豫时间})$ 。应该测量 CMR 成像检查实时的血细胞比容, 因为其可以影响钆剂从血池中的置换[26]。

纤维化或者不可逆性瘢痕的出现(表明心肌重构)已经被认为是与室性心律失常和失代偿性心律衰竭相关的总体死亡率和心脏移植指征的一种独立危险因素。定量评价心肌纤维化的程度可以指导有关于血管重建, 设备植入和药物疗法的治疗方案。尽管心内膜心肌活检是评估心肌瘢痕或纤维化最敏感的技术, 然而 Sibley 等[27]研究表明 T1 mapping 代表了一种可行的无创的替代品, 此外, 这项研究发现即使当传统心脏 MR 图像上可视的 LGE 并没有出现时, 在对比增强 T1 mapping 上缩短的 T1 持续时间是与组织学上证实的间质纤维化相关的(弥漫性纤维化)。Appelbaum 等[29]研究表明在肥厚型心肌病中中等强度 LGE

相比于高强度 LGE 是室性心律失常一种更好的预测指标, 进一步反映使用 mapping 对心肌 T1 值定量提供风险分级的必要性。Mapping 可以无创性地代表整个心肌组织的一份“样本”并且可以补充或者有可能取代有创的经静脉心肌活检[26]。至少, 当临床评估必须进行心肌活检时, T1 mapping 可以帮助识别心肌活检最合适的部位[30] [31] [32]。

5. 小结与展望

综上所述, CMR 可以对 CKD 患者早期功能及结构改变进行检测, 在为临床医生的决策提供相关依据, 改善患者预后方面具有重要意义。

参考文献

- [1] (2002) K/DOQI Clinical Practice Guidelines for Chronic Kidney Disease: Evaluation, Classification, and Stratification. *American Journal of Kidney Diseases*, **39**, S1-S266.
- [2] Hill, N.R., Fatoba, S.T., Oke, J.L., *et al.* (2016) Global Prevalence of Chronic Kidney Disease—A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS ONE*, **11**, e0158765. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158765>
- [3] Matsushita, K., Van der Velde, M., Astor, B.C., *et al.* (2010) Association of Estimated Glomerular Filtration Rate and Albuminuria with All-Cause and Cardiovascular Mortality in General Population Cohorts: A Collaborative Meta-Analysis. *The Lancet*, **375**, 2073-2081. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60674-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60674-5)
- [4] Kis, E., Ablonczy, L. and Reusz György, S. (2018) Cardiac Magnetic Resonance Imaging of the Myocardium in Chronic Kidney Disease. *Kidney and Blood Pressure Research*, **43**, 134-142. <https://doi.org/10.1159/000487367>
- [5] Charytan, D.M., Padera, R., Helfand, A.M., *et al.* (2014) Increased Concentration of Circulating Angiogenesis and Nitric Oxide Inhibitors Induces Endothelial to Mesenchymal Transition and Myocardial Fibrosis in Patients with Chronic Kidney Disease. *International Journal of Cardiology*, **176**, 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2014.06.062>
- [6] Quarta, G., Gori, M., Iorio, A., *et al.* (2020) Cardiac Magnetic Resonance in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction: Myocyte, Interstitium, Microvascular, and Metabolic Abnormalities. *European Journal of Heart Failure*, **22**, 1065-1075. <https://doi.org/10.1002/ehf.1961>
- [7] Ibanez, B., Aletras, A.H., Arai, A.E., *et al.* (2019) Cardiac MRI Endpoints in Myocardial Infarction Experimental and Clinical Trials: JACC Scientific Expert Panel. *JACC: Journal of the American College of Cardiology*, **74**, 238-256. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2019.05.024>
- [8] Badve, S.V., Palmer, S.C., Strippoli, G.F.M., *et al.* (2016) The Validity of Left Ventricular Mass as a Surrogate End Point for All-Cause and Cardiovascular Mortality Outcomes in People with CKD: A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Journal of Kidney Diseases*, **68**, 554-563. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2016.03.418>
- [9] Smiseth, O.A., Torp, H., Opdahl, A., *et al.* (2016) Myocardial Strain Imaging: How Useful Is It in Clinical Decision Making? *European Heart Journal*, **37**, 1196-1207. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehv529>
- [10] Negishi, K., Negishi, T., Haluska, B.A., *et al.* (2014) Use of Speckle Strain to Assess Left Ventricular Responses to Cardiotoxic Chemotherapy and Cardioprotection. *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **15**, 324-331. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jet159>
- [11] Scatteia, A., Baritussio, A. and Bucciarelli-Ducci, C. (2017) Strain Imaging Using Cardiac Magnetic Resonance. *Heart Failure Reviews*, **22**, 465-476. <https://doi.org/10.1007/s10741-017-9621-8>
- [12] Truong, V.T., Palmer, C., Wolking, S., *et al.* (2020) Normal Left Atrial Strain and Strain Rate Using Cardiac Magnetic Resonance Feature Tracking in Healthy Volunteers. *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **21**, 446-453. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jez157>
- [13] Bucius, P., Erley, J., Tanacli, R., *et al.* (2020) Comparison of Feature Tracking, Fast-SENC, and Myocardial Tagging for Global and Segmental Left Ventricular Strain. *ESC Heart Failure*, **7**, 523-532. <https://doi.org/10.1002/ehf2.12576>
- [14] Flachskampf, F.A., Blankstein, R., Grayburn, P.A., *et al.* (2019) Global Longitudinal Shortening: A Positive Step towards Reducing Confusion Surrounding Global Longitudinal Strain. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **12**, 1566-1567. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.03.032>
- [15] Vo, H.Q., Marwick, T.H. and Negishi, K. (2018) MRI-Derived Myocardial Strain Measures in Normal Subjects. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **11**, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.12.025>
- [16] Hoit, B.D. (2014) Left Atrial Size and Function: Role in Prognosis. *JACC: Journal of the American College of Cardiology*, **63**, 493-505. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2013.10.055>

- [17] Kowallick, J.T., Morton, G., Lamata, P., *et al.* (2015) Quantification of Atrial Dynamics Using Cardiovascular Magnetic Resonance: Inter-Study Reproducibility. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **17**, Article No. 36. <https://doi.org/10.1186/s12968-015-0140-2>
- [18] Krishnasamy, R., Isbel, N.M., Hawley, C.M., *et al.* (2015) Left Ventricular Global Longitudinal Strain (GLS) Is a Superior Predictor of All-Cause and Cardiovascular Mortality When Compared to Ejection Fraction in Advanced Chronic Kidney Disease. *PLOS ONE*, **10**, e0127044. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127044>
- [19] 周玉祥. 不同分期慢性肾病患者心肌 Native T1-mapping 和 FT-CMR 研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明医科大学, 2020.
- [20] Saeed, M., Van, T.A., Krug, R., *et al.* (2015) Cardiac MR Imaging: Current Status and Future Direction. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, **5**, 290-310.
- [21] Rubenstein, J.C., Lee, D.C., Wu, E., *et al.* (2013) A Comparison of Cardiac Magnetic Resonance Imaging Peri-Infarct Border Zone Quantification Strategies for the Prediction of Ventricular Tachyarrhythmia Inducibility. *Cardiology Journal*, **20**, 68-77. <https://doi.org/10.5603/CJ.2013.0011>
- [22] Karmonik, C., Malaty, A., Bikram, M., *et al.* (2014) Fast *in Vivo* Quantification of T1 and T2 MRI Relaxation Times in the Myocardium Based on Inversion Recovery SSFP with *in Vitro* Validation Post Gd-Based Contrast Administration. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, **4**, 88-96.
- [23] Schmidt, A., Azevedo, C.F., Cheng, A., *et al.* (2007) Infarct Tissue Heterogeneity by Magnetic Resonance Imaging Identifies Enhanced Cardiac Arrhythmia Susceptibility in Patients with Left Ventricular Dysfunction. *Circulation*, **115**, 2006-2014. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.106.653568>
- [24] Mark, P.B., Johnston, N., *et al.* (2006) Redefinition of Uremic Cardiomyopathy by Contrast-Enhanced Cardiac Magnetic Resonance Imaging. *Kidney International*, **69**, 1839-1845. <https://doi.org/10.1038/sj.ki.5000249>
- [25] Edwards, N.C., Ferro, C.J., Townend, J.N., *et al.* (2007) Myocardial Disease in Systemic Vasculitis and Autoimmune Disease Detected by Cardiovascular Magnetic Resonance. *Rheumatology (Oxford)*, **46**, 1208-1209. <https://doi.org/10.1093/rheumatology/kem077>
- [26] Hamlin, S.A., Henry, T.S., Little, B.P., *et al.* (2014) Mapping the Future of Cardiac MR Imaging: Case-Based Review of T1 and T2 Mapping Techniques. *Radiographics*, **34**, 1594-1611. <https://doi.org/10.1148/rg.346140030>
- [27] Sibley, C.T., Noureldin, R.A., Gai, N., *et al.* (2012) T1 Mapping in Cardiomyopathy at Cardiac MR: Comparison with Endomyocardial Biopsy. *Radiology*, **265**, 724-732. <https://doi.org/10.1148/radiol.12112721>
- [28] Wong, T.C., Piehler, K., Meier, C.G., *et al.* (2012) Association between Extracellular Matrix Expansion Quantified by Cardiovascular Magnetic Resonance and Short-Term Mortality. *Circulation*, **126**, 1206-1216. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.111.089409>
- [29] Appelbaum, E., Maron, B.J., Adabag, S., *et al.* (2012) Intermediate-Signal-Intensity Late Gadolinium Enhancement Predicts Ventricular Tachyarrhythmias in Patients with Hypertrophic Cardiomyopathy. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, **5**, 78-85. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.111.963819>
- [30] Moon, J.C., Messroghli, D.R., Kellman, P., *et al.* (2013) 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. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **15**, Article No. 92. <https://doi.org/10.1186/1532-429X-15-92>
- [31] Von Knobelsdorff-Brenkenhoff, F., Prothmann, M., Dieringer, M.A., *et al.* (2013) Myocardial T1 and T2 Mapping at 3 T: Reference Values, Influencing Factors and Implications. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **15**, Article No. 53. <https://doi.org/10.1186/1532-429X-15-53>
- [32] Karamitsos, T.D., Piechnik, S.K., Bannypersad, S.M., *et al.* (2013) Noncontrast T1 Mapping for the Diagnosis of Cardiac Amyloidosis. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **6**, 488-497. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2012.11.013>