

T1 ρ Mapping技术原理及其在心肌定量应用中的进展

高嘉璐¹, 张凤翔^{2*}, 杨金花^{2*}

¹内蒙古医科大学鄂尔多斯临床医学院, 内蒙古 鄂尔多斯

²鄂尔多斯市中心医院影像科, 内蒙古 鄂尔多斯

收稿日期: 2024年11月16日; 录用日期: 2024年12月9日; 发布日期: 2024年12月16日

摘 要

心脏磁共振内源性对比纵向弛豫时间成像(T1 ρ mapping)技术主要用于检测和量化心肌损伤, 该技术对心肌纤维化的评估具有不需要造影剂的优势, 但该技术的研究仍处于初级阶段。本文对其成像原理及发展、在检测和量化心肌损伤的临床应用及未来展望进行综述。

关键词

心脏磁共振成像, 心肌疾病, 参数定量技术, T1 ρ Mapping

Principles of T1 ρ Mapping Technique and Its Progress in Myocardial Quantification Application

Jialu Gao¹, Fengxiang Zhang^{2*}, Jinhua Yang^{2*}

¹Ordos Clinical Medical College of Inner Mongolia Medical University, Ordos Inner Mongolia

²Department of Imaging, Ordos Central Hospital, Ordos Inner Mongolia

Received: Nov. 16th, 2024; accepted: Dec. 9th, 2024; published: Dec. 16th, 2024

Abstract

Cardiac magnetic resonance endogenous contrast longitudinal relaxation time imaging (T1 ρ mapping) is mainly used for the detection and quantification of myocardial injury, and the technique

*通讯作者。

文章引用: 高嘉璐, 张凤翔, 杨金花. T1 ρ Mapping 技术原理及其在心肌定量应用中的进展[J]. 临床医学进展, 2024, 14(12): 438-444. DOI: 10.12677/acm.2024.14123101

has the advantage of not requiring a contrast agent for the assessment of myocardial fibrosis; however, the study of this technique is still in its infancy. This article provides an overview of its imaging principles and development, clinical applications in detecting and quantifying myocardial injury, and future perspectives.

Keywords

Cardiac Magnetic Resonance Imaging, Myocardial Disease, Parametric Quantification Techniques, T1 ρ Mapping

Copyright © 2024 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

心脏磁共振成像(CMR)作为一种先进的无创影像技术,在心血管疾病的诊断、治疗和随访中发挥着越来越重要的作用。CMR 以其多序列、多参数、多平面成像的特点,能够实现对心脏结构、功能、血流灌注及组织学特征的综合性评估,被誉为“一站式”心脏检查手段[1]。在心肌纤维化的检测中,传统检测方法例如钆对比剂延迟强化(late gadolinium enhancement, LGE)技术往往依赖于造影剂的使用,这不仅增加了患者的经济负担和潜在风险,还限制了部分特殊人群(如造影剂过敏者、肾功能不全者)的应用[2] [3]。

近年来,CMR-T1 ρ mapping 技术作为一种新兴的参数定量成像方法,逐渐引起研究者的关注。该技术无需造影剂即可实现对心肌组织特性的量化评估。已有研究表明,T1 ρ mapping 技术在关节软骨[4]、椎间盘[5] [6]、肝纤维[7]化等领域取得了显著成果,为其在心肌评估中的应用奠定了坚实基础。然而,目前关于 T1 ρ mapping 技术在心肌纤维化检测中的研究仍处于初级阶段,尚存在诸多未知和挑战[3]。

因此,本文旨在系统总结 T1 ρ mapping 技术的成像原理、发展现状及在心肌纤维化检测中的应用进展,通过深入分析其不同心肌疾病中的表现,探讨该技术的临床潜力和优势。同时,针对当前研究中存在的问题和不足,提出未来研究的方向和重点,以期为该技术的进一步发展和临床推广提供有力支持。

2. CMR-T1 ρ Mapping 技术原理

T1 ρ 弛豫时间,测量的是旋转坐标系下的磁共振自旋-晶格弛豫时间(spin-lattice relaxation time),与其他弛豫时间不同,其不仅取决于生理和主磁场,还取决于外加的自旋锁定脉冲(spin-lock, SL),自旋锁定脉冲是一种低频率、共振连续波的射频脉冲,持续的时间较长。T1 ρ 成像原理是先发射一个 90° (尖端朝下)的射频脉冲,使位于 y 轴(纵轴)方向的磁化矢量翻转到 x 轴(横轴)方向,然后,与磁化平行方向施加振幅为 B₁ 的自旋锁定射频脉冲,实现自旋锁定,然后再施加一个 90° (尖端朝上)的射频脉冲,将磁化翻转回纵向平面[8] [9]。

CMR-T1 ρ mapping 技术使用屏气平衡稳态自由进动序列(balanced steady-state free precession, bSSFP)序列获取图像,在快速采集图像前,添加一个 T1 ρ 准备模块,该准备模块是由向下、重新聚焦和向上的射频脉冲组成,穿插着连续的低频率的 SL,同时利用心电图(electrocardiogram, ECG)触发的脉冲序列,在舒张中期获取图像,沿 T1 ρ 衰减曲线在不同的自旋锁定时间获取三个短轴层面(基底部、中腔部、心尖部)的多幅图像,后将获得的图像拟合到单指数松弛模型上,形成 T1 ρ mapping 伪彩图(见图 1) [10] [11]。

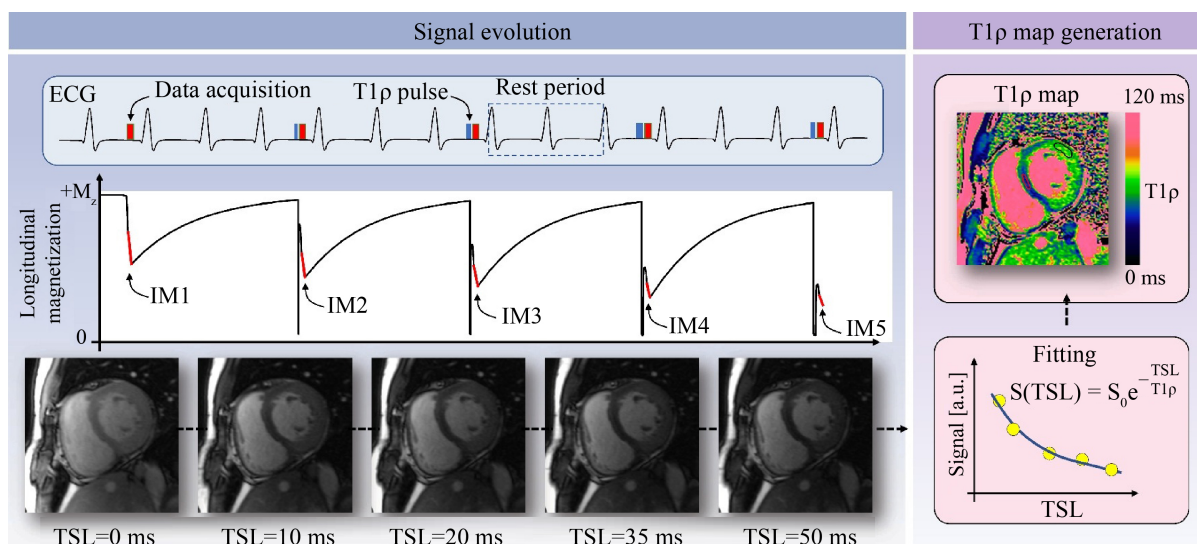


Figure 1. T1 ρ magnetization signal evolution (left) and data fitting (right). ECG: electrocardiogram, TSL: spin-lock time
图 1. T1 ρ 磁化信号演化(左)和数据拟合(右)。ECG: 心电图, TSL: 自旋锁时间

现临床使用的 2D T1 ρ mapping 技术需要多次屏气, 且覆盖范围也有限; 同时如果采集过程中磁化恢复时间不足, 测得的 T1 ρ 值将更依赖于对心率的控制, 这使得采集图像的信噪比减低, 同时采集的图像质量也会受到影响[12]。为解决这些问题, Qi H [13]等人在原有基础上进行了改良, 具体步骤如下: 1) 施加一个饱和预脉冲以重置磁化强度; 2) 使用图像导航器进行心脏的二维平移和呼吸运动校正; 3) 进行三维配准和低秩重建。改良后的技术具有高呼吸扫描效率、扫描时间短、消除心跳纵向磁化等优点, 确保了高质量的 T1 ρ 加权图像生成。

3. T1 ρ Mapping 技术的临床应用基础

T1 ρ 弛豫率($R1\rho$, $R1\rho = 1/T1\rho$)的变化对化学交换、pH 和大分子浓度很敏感。由于自旋锁定频率远小于拉莫尔频率, 因此 $R1\rho$ 对细胞外水与复杂大分子(如蛋白质)之间的低频交互作用非常敏感, 随分子浓度和质量的增加而增加, 能够体现组织成分之间的相互作用, 反映细胞的密集程度, 在分子水平上检测含水组织的代谢和生化信息的改变, 能够无创、准确地早期监测并诊断疾病[14], T1 ρ mapping 不仅在在心肌纤维化的检测中显示出不需要外源性造影剂的独特优势[15][16], 还在其他临床应用中展现出广泛潜力。例如, 在关节软骨损伤评估中[4][17], T1 ρ 成像能够反映软骨的组织特性变化; 在肝纤维化的诊断中, T1 ρ 成像技术可以评估肝脏纤维化的严重程度[18]。此外, T1 ρ 成像还可用于脑组织[19][20]、肾脏疾病[21]等其他领域的研究和诊断。

4. T1 ρ Mapping 技术在心肌成像中的应用

4.1. 左心室心肌正常 T1 ρ 值

不同的机器供应商、场强、脉冲序列、SL 频率、心率和成像位置获得的左心室正常 T1 ρ 值有所差异, 虽然多项研究报告在 1.5 T 和 3.0 T 时左心室正常的 T1 ρ 值约为 50 ms [3][22], 其中一项针对健康志愿者心肌 T1 ρ 的相关研究表明[23], 女性的 T1 ρ 值(49.72 ms)显著高于男性(46.21 ms), 且 T1 ρ 值从心脏基底部到心尖部呈显著的渐进式增加。采集数据的多变性, 阻碍了该技术在临床中的广泛应用, 这就需要对其采集方式进行规范, 还应在标准化的模型和健康志愿者中进行重复测量, 以确定健康和病变组织分化的稳定临界值。

4.2. 缺血性心肌病

缺血性心脏病(ischemic heart disease, IHD), 主要病理过程包括缺血后心肌细胞水肿、坏死、出血、瘢痕形成和纤维化[24] [25]。van Oorschot 等人先后在两项研究针对首次在关注 ST 段抬高型心肌梗死患者的研究中发现, 第一组 9 例患者[26]中, 与远处组织相比, 梗死区域 T1 ρ 值显著更高(82.4 ± 5.2 ms vs 54.2 ± 2.8 ms, $P < 0.0001$); 在第二组 21 名患者[27]中, 也报告了类似的结果(79 ± 11 ms vs 54 ± 6 ms, $P < 0.0005$), 并发现 LGE 图像与 T1 ρ mapping 上测量的节段性疤痕分布的一致性为 72%。近期一项利用 T1 ρ 评估缺血性和非缺血性心肌病的心肌损伤研究中表明, 缺血性心脏病患者的 T1 ρ 值增加了 45%, 非缺血心脏病患者增加了 34%, 表明该技术对于两种疾病心肌损伤的检测同样敏感, 且损伤部位与远处组织无重叠; 同时发现急性心肌损伤患者 T2 值是唯一与 T1 ρ 值独立相关的因素($\beta = 1.44$, $P = 0.004$), 作者认为因于心肌梗塞后导致心肌细胞水肿死亡有关[28]。以上研究表明, T1 ρ 技术对缺血性心脏病患者的心肌损伤检测存在潜力。

4.3. 肥厚型心肌病

肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)是临床上常见的心血管疾病, 在成人人群中的患病率约为 1:200~1:500, 是心源性猝死常见原因之一[29]。DONG 等[30]对 40 名 HCM 患者进行 T1 ρ 成像, 并将其与初始 T1 值和 LGE 进行比较, 作者观察到 HCM 患者的 T1 ρ 值(72.2 ms)比对照组(65.4 ms, $P = 0.618$)升高, T1 ρ 值与初始 T1 值呈正相关, 初始 T1 值及 T1 ρ 值与 LGE 程度呈中等正相关。王可颜等[31]用对 60 例成年 HCM 患者以及 20 例年龄及性别匹配的健康对照者的研究中发现对照组、室壁厚度正常组和室壁肥厚组的 T1 ρ 值依次增加(38.4 ± 1.5 ms vs 41.6 ± 5.1 ms vs 47.4 ± 7.9 ms, $F = 81.399$, $P < 0.001$), 且 3 组间 ECV、T1 ρ 值的组间两两比较差异均有统计学意义($P < 0.001$), ECV 与 T1 ρ 的一致性较好($P = 0.054$), 且 T1 ρ 在 HCM 心肌纤维化检测方面具有较高的敏感性(82.9%)和特异性(96.7%)。以上研究证明 T1 ρ mapping 能够识别 HCM 患者早期心肌纤维化。

4.4. 扩张型心肌病

扩张型心肌病(Dilated Cardiomyopathy, DCM)是最常见的非缺血性心肌病类型之一, 其特点是在没有冠状动脉疾病或异常负荷因素影响下, 左心室舒张和收缩功能障碍导致心室泵送能力降低, 心肌扩张与心肌供血减少或异常应激无关, 而是诸如病毒感染、自身免疫反应、毒素、酒精滥用、遗传原因等因素引发[32]。T1 ρ mapping 技术在针对 DCM 方面的研究比较少, 2017 年 Van Oorschot [27]在对 20 例终末期 DCM 患者研究中发现, 他们的心肌组织 T1 ρ 值较正常对照组(51.5 ± 1.2 ms, $P = 0.0024$)显著升高(55.2 ± 2.7 ms), ECV 与 T1 ρ 值之间存在显著相关性($P = 0.66$), 可以用来检测 DCM 心肌纤维化改变。但这一方向还需后续纵向和大规模的多中心研究, 以确定 DCM 患者心肌 T1 ρ mapping 技术的诊断和预后监测能力。

5. 与其他参数定量技术联合应用

尽管现阶段大量研究证明了单一定量参数技术(T1、T1 ρ 、T2、T2*以及 ECV)的应用价值, 但是单独的应用和分析, 无法对心肌疾病进行完整的评估, 前面也提到了 T1 ρ mapping 技术单独评估时的局限性[28], 多定量参数成像对心肌组织特征的观察具有一定的优越性, 可以更为准确地识别心肌改变及损伤, 并对各种心脏疾病心肌的特征性改变做出全面的评估[3]。磁共振指纹(Magnetic resonance finger-printing, MRF)技术是一种新兴的定量成像技术, 可以允许在一次高效的扫描中同时测量多个定量参数, 为心脏提供更全面的评估[33], 该技术大大地缩短了心肌定量参数的采集时间, 提高了采集效率, 现在研究中采

集时间最长的用时 16 s [34], 最短的可以在 10.9 s 内可以采集 24 个心脏时相的图[35], 有学者将 MRF 技术与深度学习结合, 可以将屏气时间缩短到 5 秒, 舒张采集窗口缩短到 150 ms, 大大提高了采集效率[36]。但是该项技术还在起步阶段, 还需对其临床实用性进行进一步研究。

6. 人工智能

将人工智能(artificial intelligence, AI)应用于 CMR 定量参数的采集及后处理分析是近几年新兴起来的。针对心肌 T1 ρ mapping 技术的 AI 应用进行的比较少, 仅限于对左心室进行自动分割, 以及对左心室全部及局部 T1 ρ 值进行自动分析和量化[10], 这样的应用不仅将减轻人工分析的负担和操作人员的不确定性, 还可以推动 T1 ρ mapping 在心脏病领域的应用。

7. 未来展望与结论

综上所述, T1 ρ mapping 技术作为一种无需造影剂的心肌定量成像方法, 在心肌纤维化的早期检测和评估中展现出巨大潜力。然而, 当前研究仍存在一些问题和挑战。首先, T1 ρ mapping 技术的特异性不足, 容易受到其他病理生理过程(如心肌水肿、炎症等)的影响, 导致误诊或漏诊。其次, 不同研究之间的 T1 ρ 值差异较大, 缺乏统一的标准和规范, 限制了技术的推广和应用。此外, T1 ρ mapping 技术在心肌成像中的应用仍处于初级阶段, 需要更多的临床研究和验证来支持其有效性和可靠性。

本研究通过综述 T1 ρ mapping 技术的原理、应用基础及其在心肌成像中的应用进展, 发现该技术具有无需造影剂、对心肌纤维化敏感等优势, 但也存在特异性不足、标准化程度不高等局限性。未来研究应致力于提高 T1 ρ mapping 技术的特异性, 建立统一的标准和规范, 同时探索多参数联合应用的可能性, 以更全面地评估心肌损伤和疾病进展。此外, 随着人工智能技术的发展, 将 AI 应用于 T1 ρ mapping 图像的采集、分析和解读中, 有望进一步提高技术的效率和准确性, 推动其在临床实践中的广泛应用。

参考文献

- [1] 唐韵, 赵世华. 2022 SCMR 心血管磁共振检查报告指南解读[J]. 磁共振成像, 2022, 13(11): 42-47, 52.
- [2] 韩彩云, 邓炜, 赵初, 等. 自旋锁定频率对心肌定量 T1 ρ 成像的影响[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(7): 731-735.
- [3] Bustin, A., Witschey, W.R.T., van Heeswijk, R.B., Cochet, H. and Stuber, M. (2023) Magnetic Resonance Myocardial T1 ρ Mapping: Technical Overview, Challenges, Emerging Developments, and Clinical Applications. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 25, 34. <https://doi.org/10.1186/s12968-023-00940-1>
- [4] 杨立伟. 磁共振 T1 ρ 成像术在膝关节软骨早期退变诊断中的应用意义[J]. 影像研究与医学应用, 2020, 4(20): 70-72.
- [5] 刘博宁, 张玫. 定量磁共振技术对腰椎间盘突出退变的研究进展[J]. 山东第一医科大学(山东省医学科学院)学报, 2024, 45(2): 119-123.
- [6] 曾琪. T1 ρ 、T2 Mapping 定量评估长期静态超负荷对腰椎间盘突出退行性变的影响[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州医科大学, 2021.
- [7] 徐蕊, 何明钰, 刘新峰, 等. 磁共振新兴技术在肝纤维化的研究进展[J]. 实用医学杂志, 2023, 39(1): 124-128.
- [8] 董双丽, 张岚. 磁共振 T1 ρ 成像的基本原理及在肝纤维化中的应用[J]. 功能与分子医学影像学(电子版), 2017, 6(1): 1155-1158.
- [9] Bustin, A., Toupin, S., Sridi, S., Yerly, J., Bernus, O., Labrousse, L., et al. (2021) Endogenous Assessment of Myocardial Injury with Single-Shot Model-Based Non-Rigid Motion-Corrected T1 Rho Mapping. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 23, 119. <https://doi.org/10.1186/s12968-021-00781-w>
- [10] de Villedon de Naide, V., Narceau, K., Ozenne, V., Villegas-Martinez, M., Nogues, V., Brillet, N., et al. (2024) Advanced Myocardial MRI Tissue Characterization Combining Contrast Agent-Free T1-Rho Mapping with Fully Automated Analysis. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. <https://doi.org/10.1002/jmri.29502>
- [11] Berisha, S., Han, J., Shahid, M., Han, Y. and Witschey, W.R.T. (2016) Measurement of Myocardial T1 ρ with a Motion

- Corrected, Parametric Mapping Sequence in Humans. *PLOS ONE*, **11**, e0151144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151144>
- [12] Kamesh Iyer, S., Moon, B., Hwuang, E., Han, Y., Solomon, M., Litt, H., *et al.* (2019) Accelerated Free-Breathing 3D T1 ρ Cardiovascular Magnetic Resonance Using Multicoil Compressed Sensing. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **21**, 5. <https://doi.org/10.1186/s12968-018-0507-2>
 - [13] Qi, H., Bustin, A., Kuestner, T., Hajhosseiny, R., Cruz, G., Kunze, K., *et al.* (2020) Respiratory Motion-Compensated High-Resolution 3D Whole-Heart T1 ρ Mapping. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **22**, 12. <https://doi.org/10.1186/s12968-020-0597-5>
 - [14] Muthupillai, R., Flamm, S.D., Wilson, J.M., Pettigrew, R.I. and Dixon, W.T. (2004) Acute Myocardial Infarction: Tissue Characterization with T1 ρ -Weighted MR Imaging—Initial Experience. *Radiology*, **232**, 606-610. <https://doi.org/10.1148/radiol.2322030334>
 - [15] Virta, A., Komu, M. and Kormano, M. (1997) T1 ρ of Protein Solutions at Very Low Fields: Dependence on Molecular Weight, Concentration, and Structure. *Magnetic Resonance in Medicine*, **37**, 53-57. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910370109>
 - [16] Zhao, F., Zhou, N., Wang, J., Zhou, H., Zou, L., Zhong, W., *et al.* (2020) Collagen Deposition in the Liver Is Strongly and Positively Associated with T1rho Elongation While Fat Deposition Is Associated with T1rho Shortening: An Experimental Study of Methionine and Choline-Deficient (MCD) Diet Rat Model. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **10**, 2307-2321. <https://doi.org/10.21037/qims-20-651>
 - [17] 张逸轩, 汤光宇. MRI T1 ρ 在骨关节炎软骨退变诊断和治疗中的进展[J]. 同济大学学报(医学版), 2021, 42(5): 711-716.
 - [18] Takayama, Y., Nishie, A., Ishimatsu, K., Ushijima, Y., Fujita, N., Kubo, Y., *et al.* (2022) Diagnostic Potential of T1 ρ and T2 Relaxations in Assessing the Severity of Liver Fibrosis and Necro-Inflammation. *Magnetic Resonance Imaging*, **87**, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2022.01.002>
 - [19] Tereshchenko, A.V., Schultz, J.L., Kunnath, A.J., Bruss, J.E., Epping, E.A., Magnotta, V.A., *et al.* (2020) Subcortical T1-Rho MRI Abnormalities in Juvenile-Onset Huntington's Disease. *Brain Sciences*, **10**, Article 533. <https://doi.org/10.3390/brainsci10080533>
 - [20] 郑泽宇. 磁共振 T1 ρ 成像及灌注加权成像对脑胶质瘤分级诊断的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2016.
 - [21] Hectors, S.J., Bane, O., Kennedy, P., El Salem, F., Menon, M., Segall, M., *et al.* (2019) T1 ρ Mapping for Assessment of Renal Allograft Fibrosis. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **50**, 1085-1091. <https://doi.org/10.1002/jmri.26656>
 - [22] 何思怡, 李博伟, 成官迅. 磁共振自旋锁定成像技术及其临床应用进展[J]. 磁共振成像, 2024, 15(6): 229-234.
 - [23] Deng, W., Xue, Y., Li, Y., An, S., Zheng, J., Qian, Y., *et al.* (2022) Normal Values of Magnetic Resonance T1 ρ Relaxation Times in the Adult Heart at 1.5 T MRI. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **58**, 477-485. <https://doi.org/10.1002/jmri.28506>
 - [24] 卢洁, 崔亚东. 磁共振成像和正电子发射断层显像在缺血性心脏病的研究进展[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2023, 25(12): 1233-1235.
 - [25] 刘明波, 何新叶, 杨晓红, 等. 《中国心血管健康与疾病报告 2023》要点解读[J]. 中国心血管杂志, 2024, 29(4): 305-324.
 - [26] van Oorschot, J.W.M., Visser, F., Eikendal, A.L.M., Vonken, E.P.A., Luijten, P.R., Chamuleau, S.A.J., *et al.* (2016) Single Breath-Hold T1 ρ -Mapping of the Heart for Endogenous Assessment of Myocardial Fibrosis. *Investigative Radiology*, **51**, 505-512. <https://doi.org/10.1097/rli.0000000000000261>
 - [27] van Oorschot, J.W.M., Güçlü, F., de Jong, S., Chamuleau, S.A.J., Luijten, P.R., Leiner, T., *et al.* (2016) Endogenous Assessment of Diffuse Myocardial Fibrosis in Patients with T1 ρ -Mapping. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **45**, 132-138. <https://doi.org/10.1002/jmri.25340>
 - [28] Bustin, A., Pineau, X., Sridi, S., van Heeswijk, R.B., Jaïs, P., Stuber, M., *et al.* (2023) Assessment of Myocardial Injuries in Ischaemic and Non-Ischaemic Cardiomyopathies Using Magnetic Resonance T1-Rho Mapping. *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*, **25**, 548-557. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jead319>
 - [29] 王怀根, 卢群, 马爱群. 《中国成人肥厚型心肌病诊断与治疗指南 2023》解读[J]. 疑难病杂志, 2023, 22(6): 561-565.
 - [30] Dong, Z., Yin, G., Yang, K., Jiang, K., Wu, Z., Chen, X., *et al.* (2022) Endogenous Assessment of Late Gadolinium Enhancement Grey Zone in Patients with Non-Ischaemic Cardiomyopathy with T1 ρ and Native T1 Mapping. *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*, **24**, 492-502. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeac128>
 - [31] 王可颜, 郑捷, 张勇, 等. 磁共振内源性对比 T1 ρ 技术在肥厚型心肌病心肌纤维化检测中的应用价值[J]. 磁共振

- 成像, 2022, 13(12): 51-57.
- [32] Heymans, S., Lakdawala, N.K., Tschöpe, C. and Klingel, K. (2023) Dilated Cardiomyopathy: Causes, Mechanisms, and Current and Future Treatment Approaches. *The Lancet*, **402**, 998-1011. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)01241-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(23)01241-2)
 - [33] 高凤珠, 翟方兵, 陈宏海. 磁共振指纹成像技术临床研究进展[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2024, 22(4): 177-179.
 - [34] Velasco, C., Cruz, G., Lavin, B., Hua, A., Fotaki, A., Botnar, R.M., *et al.* (2021) Simultaneous T₁, T₂, and T_{1ρ} Cardiac Magnetic Resonance Fingerprinting for Contrast Agent-Free Myocardial Tissue Characterization. *Magnetic Resonance in Medicine*, **87**, 1992-2002. <https://doi.org/10.1002/mrm.29091>
 - [35] Hamilton, J.I., Jiang, Y., Eck, B., Griswold, M. and Seiberlich, N. (2020) Cardiac Cine Magnetic Resonance Fingerprinting for Combined Ejection Fraction, T₁ and T₂ Quantification. *NMR in Biomedicine*, **33**, e4323. <https://doi.org/10.1002/nbm.4323>
 - [36] Hamilton, J.I. (2022) A Self-Supervised Deep Learning Reconstruction for Shortening the Breathhold and Acquisition Window in Cardiac Magnetic Resonance Fingerprinting. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **9**, Article 928546. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.928546>