

本文引用: 邓佳, 唐惠芳, 周宏, 等. 心脏磁共振 T1 mapping 在心肌病的应用及成像技术进展[J]. 中国动脉硬化杂志, 2025, 33(2): 154-162. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2025.02.009.

· 文献综述 ·

[文章编号] 1007-3949(2025)33-02-0154-09

心脏磁共振 T1 mapping 在心肌病的应用及成像技术进展

邓佳^{1,2,3}, 唐惠芳^{1,2,3}, 周宏⁴, 余莹^{1,2,3}, 杨雯敏^{1,2,3}, 周锦标^{1,2,3}, 田进伟⁵

1. 南华大学衡阳医学院附属第一医院心内科, 湖南省衡阳市 421001; 2. 湖南省心肌损伤临床医学研究中心, 湖南省衡阳市 421001; 3. 南华大学衡阳医学院附属第一医院心血管疾病研究所, 湖南省衡阳市 421001;
4. 南华大学衡阳医学院附属第一医院放射科, 湖南省衡阳市 421001; 5. 哈尔滨医科大学附属第二医院心内科, 黑龙江省哈尔滨市 150001

[摘要] 随着心脏磁共振成像技术的不断发展, T1 mapping 可以无创性、可视化和定量地评估心脏疾病的心肌纤维化、水肿和浸润性。应用 T1 mapping 评估心肌疾病的局限性和弥漫性心肌纤维化, 在疾病的诊断、鉴别、治疗和预后风险评估中发挥了重要的临床作用。本文旨在全面介绍 T1 mapping 在心肌病患者中的临床应用, 归纳常用的扫描技术及其成像原理。

[关键词] 心脏磁共振; T1 mapping; 心肌病

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

Application of cardiac magnetic resonance T1 mapping in cardiomyopathy and development of imaging technology

DENG Jia^{1,2,3}, TANG Huifang^{1,2,3}, ZHOU Hong⁴, YU Ying^{1,2,3}, YANG Wenmin^{1,2,3}, ZHOU Jinbiao^{1,2,3}, TIAN Jinwei⁵

1. Department of Cardiology, the First Affiliated Hospital, Hengyang Medical School, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Clinical Research Center for Myocardial Injury in Hunan Province, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Institute of Cardiovascular Disease, the First Affiliated Hospital, Hengyang Medical School, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 4. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital, Hengyang Medical School, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 5. Department of Cardiology, the Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

[ABSTRACT] As cardiac magnetic resonance imaging technology advances, T1 mapping has emerged as a non-invasive method offering visual and quantitative insights into myocardial fibrosis, edema, and infiltration associated with cardiac diseases. The application of T1 mapping in myocardial diseases allows for evaluating both focal and diffuse myocardial fibrosis, playing a crucial clinical role in the differentiation, treatment, and prognostic risk assessment of diseases. This article aims to provide a thorough overview of the clinical applications of T1 mapping in patients with cardiomyopathy, summarizing the commonly employed scanning techniques and imaging principles.

[KEY WORDS] cardiac magnetic resonance; T1 mapping; cardiomyopathy

心肌病是由多种病因所致的一组异质性心脏疾病, 与机械和/或心电功能障碍相关, 临床表现为心室肥厚或扩张, 它是导致心力衰竭主要的原因^[1-2]。诊断心肌病的主要手段是心肌活检和心脏

磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR), 由于心肌活检是有创的, 因此, 目前无创的 CMR 是目前诊断心肌病的重要手段。CMR 具有组织高分辨率、无辐射、广视野及可重复性好等优点, 逐渐成为心血

[收稿日期] 2024-01-17

[修回日期] 2024-02-23

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目 (82370343); 湖南省卫健委重点指导课题 (20201920); 湖南省科技创新重点工程 (2020SK1013); 湖南创新型省份建设专项经费 (2020SK4008); 南华大学附属第一医院临床研究“4310”计划 (20214310NHYCG03)

[作者简介] 邓佳, 硕士研究生, 研究方向为心脏磁共振在心血管疾病中的应用, E-mail: 2256315214@qq.com。通信作者田进伟, 博士, 主任医师, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为动脉粥样硬化易损斑块, E-mail: tianjinweidr2009@163.com。

管疾病的一站式检查手段。纵向弛豫时间定量(T1 mapping)技术是CMR对心肌组织表征分析的一种无创性技术,其可以量化患者心肌组织的水肿、心肌纤维化和浸润性^[3-4]。当心肌病患者发生心肌纤维化时,更易发生心力衰竭和心源性死亡。晚期钆增强(late gadolinium enhancement, LGE)常用于检测心肌局限性纤维化,而T1 mapping可以检测心肌的弥漫性纤维化。因此,T1 mapping逐渐成为心肌病的诊断、预后不可替代的检查方法。本文旨在总结CMR T1 mapping技术无创评估心肌病患者弥漫性心肌纤维化的临床应用,并总结其临床常用的成像技术和原理。

1 成像技术及原理

1.1 T1 mapping 技术

CMR定量序列中的T1 mapping成像技术是一种可以无创性评估心肌组织特征的检查方法。心肌T1 mapping在反转恢复序列、饱和恢复序列或两种组合后,对心肌组织中水和脂肪质子的T1弛豫进行多次采样,采用复杂的逐像素曲线拟合算法,将T1不同恢复时间点获取的多幅T1加权图像生成T1 mapping。T1恢复时间可以是空间变化的,取决于质子的局部生物化学和分子环境,因此可以用来表征组织组成的变化^[5]。T1 mapping成像技术提供了有关心肌组织特性的定量信息,例如水肿、纤维化程度等,其可作为量化弥漫性心肌纤维化的替代指标。

T1 mapping成像技术由准备脉冲和读出序列组成^[6]。三种常见的准备脉冲分别为反转恢复脉冲、饱和恢复脉冲以及两者组合的脉冲。两种常见的读出序列分别为平衡稳态自由进动序列(balanced steady-state free precession, bSSFP)和快速小角度激发序列(fast low angle shot, FLASH)。

1.1.1 反转恢复准备脉冲 目前,该脉冲最常用于改良的Look-Locker反转恢复序列(modified Look-Locker inversion recovery, MOLLI)。MOLLI序列是指在结合心电门控技术上,单次屏住呼吸时对多次心跳(通常3~5次)连续采集单次舒张期末图像^[5]。沿T1恢复曲线是多次反转时间测量,这些时间被心动周期的R波间隔分离,两次反转之间需要恢复期,因此,每次反转开始于相同的初始磁化强度^[7]。在最初的技术中有三次反转,前两次反转后获得3幅图像,在第三次反转后获得5幅图像,每次间隔期间有3个心动周期的R波等待区间,这称

为3(3)3(3)5^[7]。MOLLI序列可以高度精确地定量测量心肌组织的T1,同时由于其T1 mapping图像质量高,伪影出现率较低,可识别相对较小的解剖结构,扫描可重复性高。因此MOLLI序列成为目前临床最常用的扫描序列^[5]。但是MOLLI序列也有一定的不足之处^[6],当被校正系数、实际反转效率以及心率增快影响时,计算出的组织T1值会被低估。与MOLLI序列相比,更早提出的还有Look-Locker反转恢复序列。由于Look-Locker反转恢复序列采集过程长,对患者要求高,更重要的是,随着心率增加或磁场强度改变时,反转恢复序列估计的T1误差值会增加^[8]。所以目前反转恢复序列逐渐被MOLLI序列替代。随着技术的进步,在2010年由Piechnik等^[9]提出了缩短MOLLI序列(shortened MOLLI, ShMOLLI)。这个方案是在9次心跳憋气时间内进行连续的反转恢复测量。ShMOLLI序列只需要采集两次心跳即可完成,这可以在严重憋气困难的患者中进行T1的测量,这种方案有望成为心肌T1测量的替代方法^[10]。然而,这种方法容易受到伪影和体积效应的影响,目前临床应用相对较少。

1.1.2 饱和恢复准备脉冲 采用饱和恢复准备脉冲的单次采集序列(saturation recovery single-shot acquisition, SASHA)由连续心跳中获得10张单次平衡稳态自由进动图像组成,其中第1张图像是在没有磁化准备的情况下获得,另外9张图像遵循具有可变饱和和恢复时间的饱和脉冲,该脉冲均匀的跨越R-R间期。其中饱和恢复时间是从饱和射频脉冲结束到k空间中心线的时间^[11]。Roujol等^[12]发现与反转恢复脉冲相比,饱和恢复脉冲精度更低、精确度更高。与Roujol等的发现不同,Child等^[13]使用三种不同序列在检测扩张型心肌病和主动脉瓣狭窄患者时,发现MOLLI序列在心肌表征中提供了最强的区分准确性。出现此现象的原因可能是扫描设备与扫描序列的多样化,因此,需要进一步在各种临床场景中验证准备脉冲的精确度以及综合效率。

1.1.3 饱和-反转恢复结合的准备脉冲

Weingärtner等^[14]提出了一种结合饱和恢复和反转恢复准备脉冲的新型T1 mapping技术,名为饱和脉冲准备的心率非依赖性反转恢复(saturation pulse prepared heart-rate-independent inversion recovery, SAPPHIRE)。SAPPHIRE能够有效消除LGE成像中因每次心跳而产生的磁化历史效应,并显著降低T1 mapping对休息时间的依赖,从而优化心肌瘢痕的可视化以及弥漫性纤维化的量化评估。尽管

SAPPHIRE 技术在成像过程和数据拟合上的计算复杂度较高,效率上不如单一准备脉冲序列,但与 MOLLI 和 SASHA 技术相比,SAPPHIRE 技术在图像质量上受到心律不齐引起的运动伪影影响较小,不会出现磁化向量丢失,且对 T2 依赖性、磁化传递和反转效率的变化不敏感。此外,Sohani 等^[15]同样开发了一种结合 MOLLI 和 SASHA 两种序列的新序列 MOSHA,其诊断性能优于单一序列,但是目前仅用于科研,需要进一步临床探究。因此,利用饱和-反转恢复结合的准备脉冲在评估 T1 值的准确性方面具有较高的潜力,是一种极具发展前景的 T1 mapping 技术。

1.1.4 bSSFP 读出序列 T1 mapping 常使用 bSSFP 读出序列^[16]进行信号采集,由于它在信号采集过程中对组织自然的 T1 弛豫过程干扰最小,能够获得较高的信噪比,从而提高 T1 mapping 的准确性和可靠性。这对于心肌病变的诊断和评估尤为重要,尤其是在评估心肌纤维化和瘢痕组织时。然而,bSSFP 读出序列也存在一定的局限性。特别是在高场强磁共振设备使用时,其定量准确性可能受到组织 T2 值、磁化转移效应和偏共振频率等因素的影响。这些因素可能导致 T1 值的低估,影响定量结果的准确性。例如,组织 T2 值较小会加剧 T1 值低估的程度;磁化转移效应会导致未被准备脉冲激发的结合型质子与激发的自由质子之间发生能量交换,影响信号强度;偏共振频率则会导致图像伪影,进一步影响 T1 估值的准确性。尽管存在这些挑战,通过技术优化和参数调整,bSSFP 读出序列在心脏 T1 mapping 中仍然是一种极具价值的技术,特别是在心脏疾病的早期诊断和治疗评估中发挥着重要作用。

1.1.5 FLASH 读出序列 在 CMR 技术中的 T1 mapping 应用中,FLASH 读出序列^[17]因其对静磁场 B0 不均匀性具有较好的鲁棒性,尤其在高场强磁共振环境下能够有效抑制偏共振伪影,它是体内心肌 T1 值定量测量的另一常用技术。与 bSSFP 序列相比,FLASH 序列虽然在信噪比和血液与心肌组织间对比度方面不占优势,但其在面对磁场不均匀性时展现出高度适应性,特别是在减少由中心频率偏移导致的图像伪影方面的优势,使其在特定条件下更受青睐。此外,FLASH 序列还能显著降低磁化转移效应造成的信号衰减并减少组织 T2 值的影响,从而提高了 T1 mapping 的定量准确性。总的来说,尽管 bSSFP 序列因其良好的组织对比度和高信噪比在 CMR 中得到了广泛应用,但在处理高场强下的磁

场不均匀性及相关伪影问题时,FLASH 序列的应用提供了更为可靠的解决方案,证明在心脏 T1 mapping 中两种序列各有其适用场景和优势。

1.2 细胞外间质容积

T1 mapping 包括增强前(初始)T1 (native T1) 及增强后 T1 (post T1) 和细胞外间质容积分数 (extracellular volume fraction, ECV)。增强前 T1 mapping 是不用注射对比剂的扫描方式测量心肌的 T1 值,反映的是细胞内、外的复合信号,该技术可重复性高。初始 T1 mapping 对自由水含量增加敏感,受多种因素的影响,如细胞水肿、脂肪沉积、铁沉积以及各种纤维化导致的细胞外间质体积增大。增强后 T1 mapping 是在使用对比剂 15 ~ 20 min 后进行扫描。

ECV 反映的是细胞外间隙容积分数,通过血细胞容积调整心肌增强前和增强后 T1 mapping 可以计算 ECV 值。心脏是由细胞内空间(由各种细胞和血管壁组成)和细胞外空间(由血浆和血管外间质空间组成)构成的。钆造影剂是细胞外造影剂,不会进入细胞内空间。因此,ECV 可计算为^[3,5]:
$$ECV = (1 - \text{血细胞比容}) \times (1/T1_{\text{增强后心肌}} - 1/T1_{\text{初始心肌}}) / (1/T1_{\text{增强后血池}} - 1/T1_{\text{初始血池}})$$
。有研究表明^[18],ECV 与组织胶原分数测量心肌纤维化高度相关。同时 ECV 可以敏感地量化心肌损伤和左心室重塑程度^[19]。因此,ECV 是反映心肌间质病变(如瘢痕、弥漫性纤维化、淀粉样变及水肿等)相对稳定的指标。

尽管 LGE、初始 T1 和增强后 T1 都可以检测心肌纤维化,但是 ECV 检测弥漫性心肌纤维化的性能是最强的。Treibel 等^[20]在一项大型队列研究中发现,ECV 检测心肌纤维化与预后相关性比初始 T1、增强后 T1 更强。这可能是由于初始 T1 和增强后 T1 可能受磁场、造影剂、采集时间和血细胞比容的影响,很多患者受到限制。LGE 通常用于局限性心肌纤维化的评估,Gao 等^[21]发现 ECV 可以作为 LGE 的补充而作为检测心肌病的早期心肌纤维化的指标。表 1 展示了测量心肌纤维化各种技术的优缺点。

ECV 也会受不同钆造影剂和血细胞比容的影响^[5]。由于 T1 的变化受钆造影剂的血流动力学分布影响,因此,尽量避免使用钆苯酸二聚体。不同时间的血细胞比容不同,检测时间应尽可能接近 CMR 扫描时间,使其相对标准化,以确保血细胞比容的准确性。或者使用当地实验室的综合血细胞比容进行替代。目前 Nadjiri 等^[22]研究发现仅包含

初始 T1 mapping 序列和实时电影成像的方案很有前途,其检查时间可能会减少到 15 min 以下。

目前,关于 T1 mapping 技术的临床研究还在不

断进行,T1 mapping 技术在实现无造影剂情况下对心血管疾病的诊断、随访、评估治疗效果成为可能。

表 1. 心肌纤维化的测量方法

Table 1. Evaluate methods of myocardial fibrosis

测量方法	侵入性	纤维化程度	优点	缺点
组织学	是			
胶原体积分数		局限性	评估心肌纤维化的组织学“金标准”;直接显示心肌纤维化的严重程度	侵入性;不包括心内膜和血管周围胶原
CMR	否			
ECV		弥漫性	与组织学测量心肌纤维化相关性最强;在 CMR 所有指标中,评估心肌纤维化的诊断性能最高	受磁场、场强、供应商、脉冲序列、脉冲序列参数、造影剂、血细胞比容影响;受水肿、铁过载、蛋白质浸润、脂质沉积影响
初始 T1		弥漫性	与组织学测量心肌纤维化相关性较强;不需要注射造影剂	受磁场、场强、供应商、准备脉冲和读出序列影响
增强后 T1		弥漫性	与组织学测量心肌纤维化相关性较强	受磁场、场强、供应商、准备脉冲和读出序列、造影剂影响
晚期钆增强		局限性	可无创评估心肌纤维化的严重程度	只能评估局限性心肌纤维化;需要注射造影剂

2 临床应用

心肌病可根据是否缺血分为缺血性心肌病 (ischemic cardiomyopathy, ICM) 和非缺血性心肌病。ICM 是由于急性心肌梗死导致心肌水肿、梗死和心肌纤维化构成。而非缺血性心肌病是由不同原因引起的异质性心肌病,分为遗传性、混合性和获得性^[23]。在非缺血性心肌病中通常表现为细胞外容积增加和心肌弥漫性或局限性心肌纤维化。而浸润性心肌病是由于淀粉样原纤维等物质在心肌内沉积导致心脏结构和功能改变的一类疾病。浸润性心肌病的心脏结构改变主要包括两种,一种表现为室壁增厚,如淀粉样变性、法布雷病等;另一种表现为左心室扩张、整体或局部室壁运动异常,如心脏结节病或铁超负荷心肌病^[24-25]。

近年来 CMR 迅速发展,临床应用日益广泛,目前在欧美国家,CMR 已成为心血管疾病的常规检查方法。根据 2017 年欧洲心血管协会发布的心脏磁共振 mapping 技术共识^[3],将 T1 mapping 和 ECV 技术用于评价纤维化疾病、浸润性疾病和急性心肌损伤。因此,T1 mapping 序列中初始 T1 及 ECV 值在各种心肌疾病的诊断及判断预后方面有着重要的作用。图 1 展示了初始 T1 在心肌病患者中的临床应用。

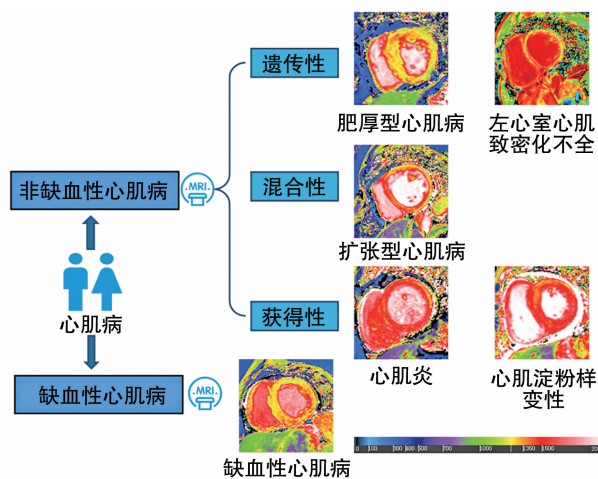


图 1. 初始 T1 在心肌病患者中的临床应用

Figure 1. Clinical application of native T1 in patients with cardiomyopathy

2.1 肥厚型心肌病

肥厚型心肌病 (hypertrophic cardiomyopathy, HCM) 是一种相对常见的遗传性心脏病,通常是编码肌节蛋白基因突变引起的^[26]。HCM 表现为心肌细胞肥大、排列杂乱无章,细胞外容积增加,弥漫性间质纤维化导致左心室肥厚和(或)左心室流出道梗阻、舒张功能异常和微小血管缺血^[27]。

在 LGE 阴性的 HCM 患者中,T1 mapping 也能早期发现弥漫性心肌纤维化。有研究表明,在 LGE

阴性和没有流出道梗阻的 HCM 患者中,其初始 T1 和 ECV 是显著升高的,且 T1 mapping 的升高与室壁厚度呈正相关,研究还发现初始 T1 和 ECV 的值越高,发生心源性猝死的风险越大^[28]。HCM 患者中组织重塑可能先于形态和功能的重塑,T1 mapping 能诊断早期的 HCM。Huang 等^[29]发现重度室壁增厚的患者较轻、中度室壁增厚患者的 T1 值更高,同时发现室壁厚度正常且收缩功能正常的 HCM 患者 T1 值也有一定程度升高。多项随访研究发现^[30-31],在严重心血管不良预后的 HCM 患者中,T1 mapping 显著增高,且与 LGE 相比,ECV 的预测价值更高。因此,T1 mapping 不仅能评估 LGE 阴性及早期 HCM 患者的弥漫性心肌纤维化,而且能预测发生不良心血管事件的风险,对临床上 HCM 患者提供了更高的诊断精确度,帮助患者及早规避风险。

T1 mapping 也能无创评估 HCM 基因突变阳性患者。Ho 等^[32]将 HCM 患者分为基因突变阳性组和基因突变阴性组,与健康志愿者比较,发现有基因突变的 HCM 患者 ECV 显著增加。同时 Wijnker 等^[33]发现,将完善心肌活检的 HCM 患者分为基因突变阳性、阴性两组进行比较,发现有肌节基因突变的患者比没有基因突变的患者局部区域的 LGE 及 ECV 更高,预后更差。

2.2 左心室心肌致密化不全

左心室心肌致密化不全(left ventricular noncompaction, LVNC)是由常染色体显性遗传或 X 连锁隐性遗传所致的一种心肌病。其特征是左心室突出的病理性小梁网形成过多和深小梁间隐窝的模式,临床表现为无症状到心力衰竭、心律失常和血栓栓塞^[34]。LVNC 诊断相对来说比较困难,使用 CMR 比心脏超声更容易识别其变化^[35],主要为左心房容积增大、左心室射血分数降低、左心室纤维化增加、左心室周向应变和左心房应变降低^[36]。Araujo-Filho 等^[37]研究发现,与 18 例健康对照组相比,36 例 LGE 阴性的 LVNC 患者初始 T1 稍高,ECV 显著增高。这表明初始 T1 和 ECV 可以比 LGE 更好地评估 LVNC 患者的心肌纤维化,但是这也有可能是由于 T1 mapping 检测的是弥漫性心肌纤维化,而 LGE 主要检测的是局限性心肌纤维化。

2.3 扩张型心肌病

扩张型心肌病(dilated cardiomyopathy, DCM)是在没有冠状动脉疾病或异常负荷条件的情况下,出现心室异常扩张和收缩功能障碍(左心室射血分数异常)的心肌病^[38]。DCM 的心肌纤维化包括局限性心肌纤维化和弥漫性心肌纤维化。T1 mapping 不

仅可以检测到弥漫性心肌纤维化,而且可以检测早期的心肌纤维化。Nakamori 等^[39]发现,初始 T1 和 ECV 无创定量评估 DCM 患者的弥漫性心肌纤维化,并与组织学细胞外间隙表现有良好的一致性,同时发现 LGE 对弥漫性心肌纤维化的定量评估价值有限。研究^[40]发现定量 T1 mapping 技术中的 ECV 能反映 DCM 的心肌胶原含量,并且无创地量化评估 DCM 不同阶段发生心肌纤维化的严重程度。

T1 mapping 是 DCM 患者发生主要不良心血管事件的独立预测因子。Li 等^[41]在 659 例 DCM 患者中发现,初始 T1 和 ECV 与预后显著相关。Puntmann 等^[42]的一项前瞻性多中心研究发现,在 637 例 DCM 患者中,初始 T1 是全因死亡和心力衰竭复合终点事件的独立预测因子。Cadour 等^[43]对 225 例 DCM 患者进行随访时发现,ECV 是 CMR 独立预测心力衰竭和心律失常相关事件的指标,初始 T1 也是心律失常相关事件的指标。同时在一项 Meta 分析中证明,初始 T1 和 ECV 可用于改善 DCM 的风险分层,对 DCM 的死亡率、发生率具有很高的预后价值^[44]。因此,T1 mapping 可以无创地检测 DCM 的弥漫性心肌纤维化,同时对鉴别不同疾病、评估不同阶段 DCM 心肌纤维化的程度和预后风险分层进行指导。

2.4 心肌炎

心肌炎是由于病毒感染或其他原因引起心肌炎性细胞浸润,伴或不伴心肌细胞坏死。其临床症状和实验室检查都是非特异性的。心肌炎的炎症区域与 CMR 异常信号区域密切相关,CMR 逐渐成为替代心肌活检成为诊断心肌炎的无创检查方法。2009 年路易斯湖诊断标准(lake louisecriteria, LLC)如下:T2WI 序列评估缺血、早期钆增强评估充血和毛细血管渗漏、LGE 评估坏死和纤维化^[45]。随着时间的进展,发现初始 T1 与 LGE 和 T2WI 相比,对轻微的局限性和弥漫性病变的心肌炎诊断性能更佳。一项 Meta 分析发现,初始 T1 对心肌炎诊断的敏感度明显高于 LLC,初始 T1、T2、ECV 与 2009 年 LLC 诊断标准的诊断效果相当,两者结合可以提高准确性,提高疾病特征并帮助指导管理^[46]。因此,2018 年根据 JACC 发表的专家共识更新了对疑似心肌炎和心肌炎症的 CMR 诊断标准,此次更新中主要将 T1 mapping 和 T2 mapping 两个参数映射技术纳入 LLC 诊断标准中,诊断标准^[47]修改为:(1)基于 T2 的标准(整体或局部心肌 T2 mapping 或 T2WI 增加);(2)心肌 T1 增加,ECV 增加或晚期钆增强,两

个标准满足其一即可诊断心肌炎。同时 Radunski 等^[48]发现,在急性心肌炎非损伤心肌中,初始 T1 和 ECV 也是明显升高的,揭示了心肌炎患者的正常心肌中也存在一定的心肌损伤。Li 等^[49]发现,将暴发性心肌炎与非暴发性心肌炎患者对比,暴发性心肌炎患者中初始 T1 mapping 和 ECV、T2 显著升高。因此,随着心肌炎的严重程度越高和越接近损伤区域,初始 T1 和 ECV 值会越高。

2.5 心肌淀粉样变性

心肌淀粉样变性是由淀粉样原纤维沉积在心脏而引起的一种严重的进行性浸润性的罕见心源性疾病,其诊断的金标准是心肌活检发现淀粉样蛋白沉积和/或心外活检中发现淀粉样蛋白沉积并伴有超声或 CMR 的淀粉样变性^[50]。利用 CMR 可以有效监测轻链型淀粉样变性治疗后心肌炎症、淀粉样物质浸润程度以及心脏功能的变化,研究也证实了 CMR 的 T1 mapping 技术、LGE 和应变等综合评估可增强早期诊断和预后评估的价值^[51]。在一项研究中,对 176 例心肌淀粉样变性患者化疗后的 T1 和 ECV 进行连续监测,结果发现化疗后心脏淀粉样蛋白沉积消退,但仅限于达到完全缓解和非常好的部分缓解患者^[52]。Thongsongsang 等^[53]的研究中发现,心肌淀粉样变性的 T1 mapping 和 ECV 值与所有心肌病患者、正常组相比是最高的,其具有最高的诊断性能、灵敏度和特异度,且在该研究中认为,与其他影像学诊断相比,初始 T1 在诊断心肌淀粉样变性中具有更高的特异度。因此,心肌淀粉样变性患者的初始 T1 和 ECV 值在所有心肌病中是最高的。

2.6 缺血性心肌病

缺血性心肌病 (ischemic cardiomyopathy, ICM) 是指冠状动脉梗阻后导致心内膜下心肌缺血缺氧和坏死,导致心肌纤维化,引起左心室壁质量增加和左心室增大^[54]。利用二维斑点超声心动图追踪技术可以评估 ICM 和非 ICM 的左心室功能改变^[55]。但 CMR 可以测量 ICM 的左心室结构和功能,可视化心肌缺血、急性心肌损伤和慢性替代纤维化的能力^[56]。尤其是 T1 mapping 技术可用于 ICM 患者的心肌水肿^[57]、慢性梗死^[58]、微血管阻塞^[59]和心肌内出血等的诊断;Kidambi 等^[57]对急性心肌梗死患者的急性期(2 天)和恢复期(3 个月)进行 CMR 扫描,结果发现急性心肌梗死期的 ECV 可以作为 LGE 评估的补充,并在恢复期作为梗死区域左心室功能恢复的额外预测指标。多项研究证

明^[58,60-61],在陈旧性心肌梗死的患者中,梗死区域心肌与非梗死区域心肌、对照组相比,初始 T1 值是明显升高的,与 LGE 测量的结果高度一致。同时 Shin 等^[59]使用初始 T1 可以准确识别急性心肌梗死患者的微循环阻塞,并且与 LGE 测量的数量和面积高度一致。Yang 等^[62]也发现有微循环阻塞患者的 ECV 更高。更重要的是,T1 mapping 诊断 ICM 的心肌纤维化和对预后预测能力优于传统的指标。Puntmann 等^[61]在一项前瞻性、多中心研究中对 665 例冠心病患者的随访中发现,初始 T1 是全因死亡的唯一独立预测指标,超过了传统的 LGE 和 LVEF。因此,在 ICM 患者中初始 T1 可以高准确度地检测梗死心肌的心肌纤维化程度高于非梗死心肌,可作为 LGE 的一个补充指标,同时初始 T1 诊断心肌纤维化和对预后预测的能力也优于传统指标。

2.7 应激性心肌病

应激性心肌病 (takotsubo syndrome, TTS) 是一种与突然、意外的物理和情绪应激 (原发性 TTS) 或严重身体疾病或创伤 (继发性 TTS) 后引发体内儿茶酚胺异常分泌密切相关的疾病^[63]。Scully 等^[64]将 TTS 与正常人进行对比,发现 TTS 心肌巨噬细胞浸润、单核细胞亚群分布异常、全身促炎症因子增加,导致心肌浸润、水肿以及纤维化。其进一步导致心室后负荷激增、冠状动脉血管痉挛和微血管功能障碍^[63]。CMR 由于其解剖的可视化和组织特征数据的独特结合逐渐变成评估 TTS 的主要工具,尤其是 mapping 技术已经很好地应用于 TTS 患者中。Dabir 等^[65]将 14 例急性 TTS 患者与正常者进行比较,急性期 TTS 组正常心肌的初始 T1 和 T2 值也显著高于对照组。Aikawa 等^[66]将 23 个心尖部急性 TTS 患者与 8 个正常者进行比较,发现初始 T1 和 ECV 值显著升高,同时在经过 3 个月的随访期后,TTS 患者的初始 T1、初始 T2 及 ECV 更高。因此,在 TTS 患者中,使用 CMR 的 mapping 技术能够更好地检测出急性期 TTS 的心肌炎性细胞浸润、心肌水肿。在随访期,能够检测出心肌纤维化,为临床预后干预提供参考。

2.8 心脏结节病

心脏结节病是一种原因不明的炎性浸润性心肌病,其主要特点是非干酪样肉芽肿沉积,可累及心脏的任何部位。慢性肉芽肿沉积在心脏并产生炎症形成心肌纤维化,导致心力衰竭^[67]。心肌活检是诊断心脏结节病的“金标准”,但由于心肌活检敏感性低,因此,常基于临床表现和晚期影像学结果而诊断。根据 2014 年心脏结节病专家共识和

2016年日本循环协会指南,CMR影像上是否存在LGE阳性是一个主要诊断标准^[68-69]。Kouranos等^[70]在321例活检证实为心外结节病的患者中发现,LGE的敏感性为97%,也是全因死亡、持续性室性心律失常和心力衰竭再住院主要综合结果的独立预测因子。多项研究证明^[71-72],T1 mapping可以作为LGE诊断心脏结节病的补充诊断。Greulich等^[73]在LGE阴性且左心室收缩功能正常的心脏结节病患者中发现,初始T1和ECV显著高于健康对照组,而增强后T1显著低于健康对照组。因此,T1 mapping技术在心脏结节病方面增加LGE的诊断价值。

3 展 望

CMR的T1 mapping技术可以无创、定量和可视化地检测心肌纤维化,对心肌疾病的诊疗、疾病分型、危险分层及预后评估有较高的临床意义。虽然T1 mapping技术也在不断地改进,但是T1 mapping仍受磁场、造影剂、血细胞比容以及操作人员水平的影响,限制了其在临床上的大规模应用。未来随着标准化扫描及后处理方案、人工智能的影像发展以及CMR硬件的提升,有望增加T1 mapping对心肌病的临床实践可行性和广泛临床应用。

[参考文献]

- [1] CIARAMBINO T, MENNA G, SANSONE G, et al. Cardiomyopathies: an overview[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(14): 7722.
- [2] TAN K, FOO R, LOH M. Cardiomyopathy in Asian cohorts: genetic and epigenetic insights[J]. *Circ Genom Precis Med*, 2023, 16(5): 496-506.
- [3] MESSROGLI D R, MOON J C, FERREIRA V M, et al. Clinical recommendations for cardiovascular magnetic resonance mapping of T1, T2, T2* and extracellular volume: a consensus statement by the society for cardiovascular magnetic resonance (SCMR) endorsed by the European association for cardiovascular imaging (EACVI) [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19(1): 75.
- [4] 周笛, 赵世华, 陆敏杰. 心肌T1-mapping进展: 成像技术与临床应用[J]. *放射学实践*, 2020, 35(7): 933-938.
ZHOU D, ZHAO S H, LU M J. Advances in myocardial T1 mapping: imaging techniques and clinical applications [J]. *Radiol Pract*, 2020, 35(7): 933-938.
- [5] ROBINSON A A, CHOW K, SALERNO M. Myocardial T1 and ECV measurement: underlying concepts and technical considerations [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(11 Pt 2): 2332-2344.
- [6] 贾韬宇, 秦培鑫, 扈锋, 等. T1 mapping技术原理及其在心肌定量的研究进展[J]. *磁共振成像*, 2022, 13(3): 151-158.
JIA T Y, QIN P X, HU F, et al. Principle of T1 mapping technique and its research progress in myocardial quantification[J]. *Chin J Magn Reson Imag*, 2022, 13(3): 151-158.
- [7] KELLMAN P, HANSEN M S. T1-mapping in the heart: accuracy and precision[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2014, 16(1): 2.
- [8] NACIF M S, TURKBAY E B, GAI N, et al. Myocardial T1 mapping with MRI: comparison of look-locker and MOLLI sequences [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2011, 34(6): 1367-1373.
- [9] PIECHNIK S K, FERREIRA V M, DALL'ARMELLINA E, et al. Shortened modified look-locker inversion recovery (ShMOLLI) for clinical myocardial T1-mapping at 1.5 and 3 T within a 9 heartbeat breathhold[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2010, 12(1): 69.
- [10] HUANG L, NEJI R, NAZIR M S, et al. Fast myocardial T1 mapping using shortened inversion recovery based schemes[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 50(2): 641-654.
- [11] CHOW K, FLEWITT JA, GREEN JD, et al. Saturation recovery single-shot acquisition (SASHA) for myocardial T(1) mapping [J]. *Magn Reson Med*, 2014, 71(6): 2082-2095.
- [12] ROUJOL S, WEINGÄRTNER S, FOPPA M, et al. Accuracy, precision, and reproducibility of four T1 mapping sequences: a head-to-head comparison of MOLLI, ShMOLLI, SASHA, and SAPPHIRE[J]. *Radiology*, 2014, 272(3): 683-689.
- [13] CHILD N, SUNA G, DABIR D, et al. Comparison of MOLLI, ShMOLLI, and SASHA in discrimination between health and disease and relationship with histologically derived collagen volume fraction[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(7): 768-776.
- [14] WEINGÄRTNER S, AKÇAKAYA M, BASHA T, et al. Combined saturation/inversion recovery sequences for improved evaluation of scar and diffuse fibrosis in patients with arrhythmia or heart rate variability[J]. *Magn Reson Med*, 2014, 71(3): 1024-1034.
- [15] SOHANI M, VAN DER GEEST RJ, MAIER A, et al. Improved cardiac T1 mapping accuracy and precision with a new hybrid MOLLI and SASHA technique: MOSHA[J]. *Magn Reson Imaging*, 2022, 89: 33-41.
- [16] BENTATOU Z, TROALEN T, BERNARD M, et al. Simultaneous multi-slice T1 mapping using MOLLI with blipped CAIPIRINHA bSSFP[J]. *Magn Reson Imaging*, 2023, 95: 90-102.
- [17] MARTY B, COPPA B, CARLIER P G. Fast, precise, and accurate myocardial T1 mapping using a radial MOLLI sequence with FLASH readout[J]. *Magn Reson Med*, 2018, 79(3): 1387-1398.
- [18] KAMMERLANDER AA, MARZLUF BA, ZOTTER-TUFARO C, et al. T1 mapping by CMR imaging: from histological validation to clinical implication[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(1): 14-23.
- [19] CHEN B H, WU C W, AN D A, et al. Myocardial extracellular volume quantified by cardiac magnetic resonance predicts left ventricular aneurysm following acute myocardial infarction[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(1): 283-293.
- [20] TREIBEL T A, FRIDMAN Y, BERING P, et al. Extracellular volume associates with outcomes more strongly than native or post-contrast myocardial T1[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(1 Pt 1): 44-54.
- [21] GAO Y, WANG H P, LIU M X, et al. Early detection of myocar-

- dial fibrosis in cardiomyopathy in the absence of late enhancement: role of T1 mapping and extracellular volume analysis[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(3): 1982-1991.
- [22] NADJIRI J, ZASCHKA A L, STRAETER A S, et al. Evaluation of a shortened cardiac MRI protocol for left ventricular examinations: diagnostic performance of T1-mapping and myocardial function analysis[J]. *BMC Med Imaging*, 2019, 19(1): 57.
- [23] MCKENNA WJ, MARON BJ, THIENE G. Classification, epidemiology, and global burden of cardiomyopathies[J]. *Circ Res*, 2017, 121(7): 722-730.
- [24] SEWARD JB, CASACLANG-VERZOSA G. Infiltrative cardiovascular diseases: cardiomyopathies that look alike[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2010, 55(17): 1769-1779.
- [25] KOTTAM A, HANNEMAN K, SCHENONE A, et al. State-of-the-art imaging of infiltrative cardiomyopathies: a scientific statement from the American heart association[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2023, 16(11): e000081.
- [26] VULLAGANTI S, LEVINE J, RAIKER N, et al. Fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy patients with and without sarcomere gene mutations[J]. *Heart Lung Circ*, 2021, 30(10): 1496-1501.
- [27] MARON BJ, DESAI MY, NISHIMURA RA, et al. Management of hypertrophic cardiomyopathy: JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 79(4): 390-414.
- [28] XU J, ZHUANG B Y, SIRAJUDDIN A, et al. MRI T1 mapping in hypertrophic cardiomyopathy: evaluation in patients without late gadolinium enhancement and hemodynamic obstruction[J]. *Radiology*, 2020, 294(2): 275-286.
- [29] HUANG L, RAN L P, ZHAO P J, et al. MRI native T1 and T2 mapping of myocardial segments in hypertrophic cardiomyopathy: tissue remodeling manifested prior to structure changes[J]. *Br J Radiol*, 2019, 92(1104): 20190634.
- [30] LI Y C, LIU X M, YANG F Y, et al. Prognostic value of myocardial extracellular volume fraction evaluation based on cardiac magnetic resonance T1 mapping with T1 long and short in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(7): 4557-4567.
- [31] QIN L, MIN J H, CHEN C H, et al. Incremental values of T1 mapping in the prediction of sudden cardiac death risk in hypertrophic cardiomyopathy: a comparison with two guidelines[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 661673.
- [32] HO CY, ABBASI SA, NEILAN TG, et al. T1 measurements identify extracellular volume expansion in hypertrophic cardiomyopathy sarcomere mutation carriers with and without left ventricular hypertrophy[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(3): 415-422.
- [33] WIJNKER PJM, VAN DER VELDEN J. Mutation-specific pathology and treatment of hypertrophic cardiomyopathy in patients, mouse models and human engineered heart tissue[J]. *Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis*, 2020, 1866(8): 165774.
- [34] ICHIDA F. Left ventricular noncompaction[J]. *Circ J*, 2009, 73(1): 19-26.
- [35] ROSS S B, JONES K, BLANCH B, et al. A systematic review and Meta-analysis of the prevalence of left ventricular non-compaction in adults[J]. *Eur Heart J*, 2020, 41(14): 1428-1436.
- [36] ZHOU D, LI S J, SIRAJUDDIN A, et al. CMR characteristics, gene variants and long-term outcome in patients with left ventricular non-compaction cardiomyopathy[J]. *Insights Imaging*, 2021, 12(1): 184.
- [37] ARAUJO-FILHO J A B, ASSUNCAO A N J, TAVARES DE MELO M D, et al. Myocardial T1 mapping and extracellular volume quantification in patients with left ventricular non-compaction cardiomyopathy[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(8): 888-895.
- [38] HEYMANS S, LAKDAWALA N K, TSCHÖPE C, et al. Dilated cardiomyopathy: causes, mechanisms, and current and future treatment approaches[J]. *Lancet*, 2023, 402(10406): 998-1011.
- [39] NAKAMORI S, DOHI K, ISHIDA M, et al. Native T1 mapping and extracellular volume mapping for the assessment of diffuse myocardial fibrosis in dilated cardiomyopathy[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(1): 48-59.
- [40] AUS DEM SIEPEN F, BUSS S J, MESSROGHLI D, et al. T1 mapping in dilated cardiomyopathy with cardiac magnetic resonance: quantification of diffuse myocardial fibrosis and comparison with endomyocardial biopsy[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(2): 210-216.
- [41] LI S, ZHOU D, SIRAJUDDIN A, et al. T1 mapping and extracellular volume fraction in dilated cardiomyopathy: a prognosis study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(4): 578-590.
- [42] PUNTMANN V O, CARR-WHITE G, JABBOUR A, et al. T1-mapping and outcome in nonischemic cardiomyopathy: all-cause mortality and heart failure[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(1): 40-50.
- [43] CADOUR F, QUEMENEUR M, BIERE L, et al. Prognostic value of cardiovascular magnetic resonance T1 mapping and extracellular volume fraction in nonischemic dilated cardiomyopathy[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2023, 25(1): 7.
- [44] KIAOS A, ANTONAKAKI D, BAZMPANI M A, et al. Prognostic value of cardiovascular magnetic resonance T1 mapping techniques in non-ischemic dilated cardiomyopathy: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Int J Cardiol*, 2020, 312: 110-116.
- [45] FRIEDRICH M G, SECHTEM U, SCHULZ-MENGER J, et al. Cardiovascular magnetic resonance in myocarditis: a JACC white paper[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 53(17): 1475-1487.
- [46] PAN J A, LEE Y J, SALERNO M. Diagnostic performance of extracellular volume, native T1, and T2 mapping versus lake louise criteria by cardiac magnetic resonance for detection of acute myocarditis: a Meta-analysis[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(7): e007598.
- [47] FERREIRA V M, SCHULZ-MENGER J, HOLMVANG G, et al. Cardiovascular magnetic resonance in nonischemic myocardial inflammation: expert recommendations[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72(24): 3158-3176.
- [48] RADUNSKI U K, LUND G K, SÄRING D, et al. T1 and T2 mapping cardiovascular magnetic resonance imaging techniques reveal unapparent myocardial injury in patients with myocarditis[J]. *Clin Res Cardiol*, 2017, 106(1): 10-17.
- [49] LI H J, ZHU H, YANG Z X, et al. Tissue characterization by mapping and strain cardiac MRI to evaluate myocardial inflammation in fulminant myocarditis[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020, 52

- (3): 930-938.
- [50] GARCIA-PAVIA P, RAPEZZI C, ADLER Y, et al. Diagnosis and treatment of cardiac amyloidosis: a position statement of the ESC working group on myocardial and pericardial diseases[J]. *Eur Heart J*, 2021, 42(16): 1554-1568.
- [51] LI X, HUANG S S, MIAO H L, et al. Multiparameter cardiac magnetic resonance to monitor therapeutic effect after chemotherapy in light chain amyloidosis patients[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(7): 1485-1487.
- [52] MARTINEZ-NAHARRO A, PATEL R, KOTTECHA T, et al. Cardiovascular magnetic resonance in light-chain amyloidosis to guide treatment[J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(45): 4722-4735.
- [53] THONGSONGSANG R, SONGSANGJINDA T, TANAPIBUNPON P, et al. Native T1 mapping and extracellular volume fraction for differentiation of myocardial diseases from normal CMR controls in routine clinical practice[J]. *BMC Cardiovasc Disord*, 2021, 21(1): 270.
- [54] DEL BUONO M G, MORONI F, MONTONE R A, et al. Ischemic cardiomyopathy and heart failure after acute myocardial infarction[J]. *Curr Cardiol Rep*, 2022, 24(10): 1505-1515.
- [55] 朱慧, 左后娟, 马飞, 等. 二维斑点追踪超声心动图评价非缺血性心肌病和缺血性心肌病的左室功能[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2021, 29(7): 595-599.
- ZHU H, ZUO H J, MA F, et al. Evaluation of left ventricular function in patients with non-ischemic cardiomyopathy and ischemic cardiomyopathy by two-dimensional speckle tracking echocardiography[J]. *Chin J Arterioscler*, 2021, 29(7): 595-599.
- [56] EMRICH T, HALFMANN M, SCHOEPF U J, et al. CMR for myocardial characterization in ischemic heart disease: state-of-the-art and future developments[J]. *Eur Radiol Exp*, 2021, 5(1): 14.
- [57] KIDAMBI A, MOTWANI M, UDDIN A, et al. Myocardial extracellular volume estimation by CMR predicts functional recovery following acute MI[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(9): 989-999.
- [58] WANG G, LEE S E, YANG Q, et al. Multicenter study on the diagnostic performance of native-T1 cardiac magnetic resonance of chronic myocardial infarctions at 3T[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(6): e009894.
- [59] SHIN J M, CHOI E Y, PARK C H, et al. Quantitative T1 mapping for detecting microvascular obstruction in reperfused acute myocardial infarction: comparison with late gadolinium enhancement imaging[J]. *Korean J Radiol*, 2020, 21(8): 978-986.
- [60] NAKAMORI S, ALAKBARLI J, BELLM S, et al. Native T1 value in the remote myocardium is independently associated with left ventricular dysfunction in patients with prior myocardial infarction[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 46(4): 1073-1081.
- [61] PUNTMANN V O, CARR-WHITE G, JABBOUR A, et al. Native T1 and ECV of noninfarcted myocardium and outcome in patients with coronary artery disease[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 71(7): 766-778.
- [62] YANG M X, HE Y, MA M, et al. Characterization of infarcted myocardium by T1-mapping and its association with left ventricular remodeling[J]. *Eur J Radiol*, 2021, 137: 109590.
- [63] LYON AR, CITRO R, SCHNEIDER B, et al. Pathophysiology of takotsubo syndrome: JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2021, 77(7): 902-921.
- [64] SCALLY C, ABBAS H, AHEARN T, et al. Myocardial and systemic inflammation in acute stress-induced (takotsubo) cardiomyopathy[J]. *Circulation*, 2019, 139(13): 1581-1592.
- [65] DABIR D, LUETKENS J, KUETTING D L R, et al. Cardiac magnetic resonance including parametric mapping in acute takotsubo syndrome: preliminary findings[J]. *Eur J Radiol*, 2019, 113: 217-224.
- [66] AIKAWA Y, NOGUCHI T, MORITA Y, et al. Clinical impact of native T1 mapping for detecting myocardial impairment in takotsubo cardiomyopathy[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(10): 1147-1155.
- [67] TAN J L, TAN B E X, CHEUNG J W, et al. Update on cardiac sarcoidosis[J]. *Trends Cardiovasc Med*, 2023, 33(7): 442-455.
- [68] BIRNIE D H, SAUER W H, BOGUN F, et al. HRS expert consensus statement on the diagnosis and management of arrhythmias associated with cardiac sarcoidosis[J]. *Heart Rhythm*, 2014, 11(7): 1305-1323.
- [69] TERASAKI F, AZUMA A, ANZAI T, et al. JCS 2016 guideline on diagnosis and treatment of cardiac sarcoidosis-digest version[J]. *Circ J*, 2019, 83(11): 2329-2388.
- [70] KOURANOS V, TZELEPIS G E, RAPTI A, et al. Complementary role of CMR to conventional screening in the diagnosis and prognosis of cardiac sarcoidosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(12): 1437-1447.
- [71] TREIBER J, NOVAK D, FISCHER-RASOKAT U, et al. Regional extracellular volume within late gadolinium enhancement-positive myocardium to differentiate cardiac sarcoidosis from myocarditis of other etiology: a cardiovascular magnetic resonance study[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2023, 25(1): 8.
- [72] CHEUNG E, AHMAD S, AITKEN M, et al. Combined simultaneous FDG-PET/MRI with T1 and T2 mapping as an imaging biomarker for the diagnosis and prognosis of suspected cardiac sarcoidosis[J]. *Eur J Hybrid Imaging*, 2021, 5(1): 24.
- [73] GREULICH S, KITTERER D, LATUS J, et al. Comprehensive cardiovascular magnetic resonance assessment in patients with sarcoidosis and preserved left ventricular ejection fraction[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(11): e005022.

(此文编辑 许雪梅)