

心脏磁共振在理论研究及临床应用中的新进展*

陈榆舒, 郜发宝[△]

四川大学华西医院 放射科(成都 610041)

【摘要】 心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)是近年来广泛运用于研究与临床工作的无创影像检查手段,在心血管疾病诊断、疗效评估及预后判断等方面具有特殊价值。近年来,随着磁共振技术的革新与优化,弥补了以往 CMR 成像中的局限,在判断心肌细胞活性、心肌局部及整体功能以及心肌纹理特征等方面取得明显进展。本专题通过对磁共振心肌功能评价、磁共振心肌组织特征以及磁共振心肌纹理特征分析等问题进行评述,引导更精准的临床患者疾病评估,并推动心脏临床与基础研究。

【关键词】 心脏磁共振 诊断 无创影像检查 心肌纹理特征

Cardiac Magnetic Resonance in Cardiovascular Disease Research and Its Clinical Application: an Update CHEN Yu-shu, GAO Fa-bao[△]. Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

[△] Corresponding author, E-mail: gaofabao@wchscu.cn

【Abstract】 Cardiac magnetic resonance (CMR) is a non-invasive imaging technology, which has been used widely in clinical and basic researches on cardiovascular disease in recent years. With the innovation and optimization of CMR technologies, significant progress has been developed in the evaluation of myocardial viability, the function of regions and global myocardium, and the myocardial texture characteristics. Therefore, with the discussion on the progress of CMR to draw more and more attention in clinics, we hope to improve the application of CMR not only in the basic research but also in the diagnosis and precise evaluation aspects of cardiovascular disease.

【Key words】 Cardiac magnetic resonance Diagnosis Non-invasive imaging technology Myocardial texture characteristics

心脏磁共振(CMR)自 20 世纪 80 年代逐步应用于临床,其具有较高的时间和空间分辨率、最佳的软组织对比度,可任意层面、多角度、多方向、多参数、多序列成像,并不受患者体型限制,能够对组织的解剖、功能、灌注及组织特征等进行“一站式”检查,是目前心血管疾病最理想的无创性检查手段,被认为是评价心肌结构和功能的“金标准”^[1],在心血管疾病诊断、鉴别诊断、病情评估、预后等方面具有重要作用^[2-4]。随着 CMR 技术的不断革新和运用,各种新的序列技术和临床研究成果日新月异。鉴于此,本专题分别关注了 CMR 心肌功能评价、CMR 心肌组织特征评估、CMR 心肌纹理特征分析等问题,现做简要评述。

1 CMR 心肌功能评价

在传统的心功能评价中,射血分数(EF)、收缩末容积(end-systolic volume, ESV)、舒张末容积(end-diastolic volume, EDV)等参数用于评估心脏整体功能情况^[5]。但心脏运动是三维立体模式,心肌纤维呈不同方向走行的螺旋型分布。且病变部位可能是节段^[6],或是全心损伤^[7]。越来越多的研究发现单一的参数并不能全面、精准的评估整体心脏功能,更不能精准反映局部心肌的收缩、舒张运动。

心肌应变可以评估局部或整体心肌纵向、径向、环向运动情况,是近年来 CMR 的研究热点之一。研究内容集中在正常成年人的各房、室的心肌应变范围;影响心肌应变差异的因素^[8];缺血性心肌病(冠心病^[9]等)或非缺血性心肌病(肥厚性心肌病^[10]、扩张性心肌病^[11]等)疾病心肌应变参数(如全心纵向应变、全心环向应变等)的改变情况,以及心肌应变在预测后期不良心脏事件的价值;节段心肌

* 国家自然科学基金(No. 81520108014, No. 81771800, No. 81829003),国家科技部重大研究项目(No. 2016YFA0201402)和四川省科技厅国际合作项目(No. 2017HH0045)资助

[△] 通信作者, E-mail: gaofabao@wchscu.cn

应变与对应节段的心室壁厚度、心肌纤维化程度的相互关系等^[12]。本专题中,王哲涛等^[13]利用 CMR 组织追踪技术评估心肌淀粉样变性患者的全心纵向、环向、径向应变峰值以及对应的全心心内膜、心外膜应变峰值改变情况,并评估应变与左室收缩末心肌质量(left ventricular end-systolic myocardial mass, LVMS)、舒张末心肌质量(left ventricular end-diastolic myocardial mass, LVMD)、LVESV、LVEDV、左室每搏量(stroke volume, SV)以及左室 EF 之间的关系,发现以射血分数为 50%为界分组,各组患者心肌应变峰值与正常组均存在显著差异,且心内膜纵向应变(endocardium longitudinal strain, ENDO-LS)、环向应变(endocardium circumferential strain, ENDO-CS)较对应的心外膜应变绝对值降低,提示蛋白的浸润程度不同,心肌内膜与心肌外膜受蛋白质浸润的程度可能存在差异;朱静等^[14]以自身免疫性心肌炎大鼠模型模拟心肌炎患者心肌损伤,比较组织特征(feature tracking, FT)2D 及 3D 心肌应变参数在心肌炎免疫损伤阶段中的诊断价值,多维度分析心肌炎后心肌应变改变情况;王磊等^[15]基于 7.0T 小动物专用磁共振,比较正常大鼠及树鼩的 CMR 特征,为后期树鼩心脏影像的相关研究进行前期探索,并提示不同种属间心肌应变参数存在物种差异,为心血管疾病及新药研究的动物模型选择提供新的思路,并为后期大量研究提供树鼩心功能及心肌应变正常参考值。可以看出,磁共振心肌应变参数较多,但各参数在已有研究中的应用价值存在争议,诊断效能尚未统一,对于不同心血管疾病,各参数的适用度仍有待进一步探究及验证,磁共振心肌应变分析也仍有待在临床工作中推广。

2 CMR 心肌组织特征评估

CMR 心肌组织特征评估是基于多组织对比度成像,反映心肌组织内多种组织特征,如:水肿、出血、坏死、纤维化、铁沉积、淀粉样变性等,从而更准确的判断心肌病理改变,明确疾病诊断及病情严重程度。

2.1 心肌活性评估

心肌活性评估在评价心肌损伤严重程度及预后评估中具有重要价值。以往研究已经发现无活性心肌的功能不可逆损伤且被坏死组织或纤维组织替代,在疾病演变中发挥着至关重要的作用^[16-17],是临床诊断最为重要的评价指标。在 KIM 等^[18]首次

报道磁共振延迟强化成像(late-gadolinium enhancement, LGE)技术可用于评估梗死心肌之后,大量研究验证并深入探究了 LGE 在评价心肌活性的应用价值^[19]。LGE 被认为是诊断局灶性心肌纤维化的活检替代方法^[20],是判断心肌活性的无创“金标准”,广泛运用于临床工作及基础研究中。最近, BENITO 等^[21]通过将 3D-LGE 图像与电生理图像配准,并直接指导心肌内消融,是 LGE 临床价值的又一重要突破。因此,获取最优 LGE 图像是准确评估心肌活性的重要前提。本专题中,程巍等^[22]分别比较了 38 例扩张型心肌病患者的 MOCO-PSIR-LGE、single-shot-PSIR-LGE 以及 segmented-PSIR-LGE 图像质量以及心肌延迟强化区域信噪比情况,结果显示 MOCO-PSIR-LGE 序列在扩张型心肌病致心力衰竭心肌纤维化诊断中的图像质量和诊断准确率显著高于其他序列,具有较高的临床应用价值。

但随着 LGE 的广泛运用以及心肌应变等技术的出现,越来越多的研究发现急性期心肌损伤病理改变较复杂,急性期 LGE 区域伴随着后期功能恢复^[23-25]。在本专题中,夏睿等^[26]分别评估了心肌梗死患者经皮灌注动脉介入治疗后以及心肌梗死大鼠缺血再灌注后透壁性心肌梗死、心内膜下心肌梗死及无梗死心肌节段心肌应变情况,从临床及基础的角度同时发现再灌注早期梗死节段心肌运动能力降低并伴后期不同程度功能恢复。笔者认为, LGE 反映的是对比剂在不同心肌细胞内的血流动力学情况,而急性期虽然损伤的心肌细胞严重程度不同,但细胞膜通透性均改变,可能存在对比剂停留时间延长的现象,即“LGE 强化”。未来,需要综合更多信息准确判断心肌活性情况。

2.2 心肌组织定量评估

近年来,组织定量成像技术的出现,弥补了以往 CMR 半定量或定性评估的局限性^[27],使 CMR 进入了崭新的时代。这类技术可以定量单一参数,并以伪彩图标记心肌组织,极其敏感地检测心肌组织不同病理改变。定量纵向弛豫时间(T1 mapping)成像定量组织 T1 值,在心肌内出现水肿、局限性或弥散性纤维化、淀粉样变性、心肌内脂质以及铁沉积时, T1 值均发生改变^[28]。其中,由于弥散性纤维化细胞外间质被胶原替代而增大,大量研究发现基于对比剂前后 T1 mapping 技术的细胞外容积(extracellular volume, ECV)与心肌弥散性纤维化严重程度密切相关, ECV 极有可能成为评价弥散性纤维化的无创“金标准”,弥补 LGE 技术的局限^[29]。

定量 $T1\rho$ ($T1\rho$ mapping) 成像是新出现用于评估心肌纤维化的另一磁共振技术^[30-31]。非对比剂成像是该技术最特异的优点,对于肾功能不全患者具有重要意义,有望替代 LGE 及 ECV 成像评估心肌纤维化^[31-32],该技术所获 $T1\rho$ 值可能成为评估心肌纤维化(局限性或弥散性)的影像学标志物。此外,定量横向弛豫时间 ($T2$ mapping) 在评价心肌内水肿、急性心肌损伤时,相对其他技术具有明显优势^[33-34],目前被用于确定急性期心肌梗死后可挽救区域^[35]、诊断心肌炎^[36]。研究报道, $T2$ mapping 在检出急性心肌炎或应激性心肌病的灵敏度和特异度均可达 90%^[37]。但在其他疾病中的应用价值仍需要大量的基础及临床研究。另一定量技术 $T2^*$ mapping 成像通过定量 $T2^*$ 值,评估组织内铁含量,由于技术限制,近年来才逐步用于心肌铁含量评估,目前被用于评估心肌内出血,心肌内铁过载等研究^[38-40]。但值得注意的是,上述技术尚未建立明确的疾病诊断标准及分级标准,且如何有效控制心脏运动及呼吸运动带来的伪影也是目前较大的难点。

2.3 心肌代谢评估

组织细胞的脂代谢及氧代谢水平可以反映心肌细胞功能情况。目前,磁共振氢谱 (^1H -magnetic resonance spectroscopy, ^1H -MRS) 是唯一可对活体细胞内脂肪酸含量进行定量检测的方法^[41-42],但由于技术限制, ^1H -MRS 在心脏部位的应用较局限,目前研究较少。已有研究认为较高磁场强度获得的 MRS 图像质量较好,准确度更高^[41]。血氧水平依赖成像 (blood oxygenation level-dependent MRI, BOLD) 评估组织细胞氧代谢水平,是近年来最热门的 CMR 研究之一,用于评估心肌内微循环、心肌细胞氧代谢情况,在疾病发生、发展及转归中具有重要意义^[43-44]。此外,相对于 BOLD 进行氧代谢水平半定量评估,有研究报道可以通过定量评估心肌组织内氧摄取分数技术能更直观的反映心肌内氧水平情况^[45-46],为心肌氧代谢评估提供新的评价思路,被认为是评估心肌是否存活的极有潜力的磁共振成像技术。

3 心肌灌注评估

磁共振心肌灌注成像,尤其是负荷灌注成像在疾病诊断、预后评估等方面提供了重要参考信息,是 CMR 评估不可缺少的部分^[47]。尽管由于负荷灌注需要使用药物或者运动扩张血管、增加氧耗量,需要配置急救设备及团队,导致负荷灌注成像应用受限。

但负荷灌注成像在评估微循环损伤、潜在心肌缺血等病灶中具有重要价值,一直是 CMR 的研究热点之一^[47-48]。另外,虽已有研究通过全定量心肌灌注分析评估部分心血管疾病如冠心病等患者血流储备情况^[48],但在目前的临床工作及研究中,心肌灌注分析仍是临床应用的难点问题,多进行定性及半定量评价,仍有待成熟的全定量心肌灌注分析方法的推广及应用,获得更多疾病心肌血流灌注及血流储备信息。

4 心肌纹理特征分析

磁共振纹理分析是近几年发展起来的新兴技术,通过提取图像内部大量纹理特征信息,并对所获得的特征数据进行挖掘和分析,量化分析肉眼无法分辨的组织信号差异,实现对组织不同纹理特征的定量或定性描述。目前,已有研究进行了急、慢性心梗患者 LGE 图像及心脏电影图像、肥厚性心肌病患者 $T1$ 加权图像^[49]、扩张型心肌病患者的 $T1$ mapping 纹理分析^[50]等。事实上,在人工智能飞速发展的当下,纹理分析虽广泛运用于医学领域,但主要集中于肿瘤鉴别和疾病分期中,而心肌纹理分析研究极少,且研究结果缺乏流行病学及病理验证,需要大量研究数据进行论证。同时,心肌纹理分析是否受影响 CMR 图像差异因素的影响也有待研究,充分了解各种可能导致分析结果差异的因素,可以更好地对各种疾病进行诊断、鉴别诊断以及疾病分期分级。因此,在大数据、人工智能及云医疗的背景下,心肌纹理分析及后续深度学习必将成为研究热点之一,具有重要的临床推广意义。本专题中吴韬等^[51]分析了正常汉族志愿者的 $T1$ mapping 图像的纹理特征,并探究其与年龄、性别之间的关系,提示基于 $T1$ mapping 图像的纹理特征在中国汉族健康人群中存在年龄和性别差异,为纹理特征分析用于疾病诊断等提供基线数据及针对性分析思路。

总之,随着 CMR 技术的不断创新与优化,基于 CMR 获得的心脏病病理改变日趋精准,获得的心肌组织特征参数也越来越多。尽管磁共振探究心肌应变、心肌灌注、心肌组织特征目前已取得一定成果,心肌纹理分析也在大数据时代获得初步发展,但仍有诸多问题亟待解决。关注和运用最新进展,选择最佳 CMR 成像技术、获取全面病理改变信息、寻求最佳影像学特征参数始终是推动临床及基础研究、开展临床工作的重要前提和保障。

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. *Circulation*, 2010, 121(22): 2462-2508.
- [2] PEREA RJ, ORTIZ-PEREZ JT, SOLE M, *et al.* T1 mapping: characterisation of myocardial interstitial space. *Insights Imaging*, 2015, 6(2): 189-202.
- [3] GANDHI MS, KAMALOV G, SHAHBAZ AU, *et al.* Cellular and molecular pathways to myocardial necrosis and replacement fibrosis. *Heart Fail Rev*, 2011, 16(1): 23-34.
- [4] KIM RJ, FIENO DS, PARRISH TB, *et al.* Relationship of MRI delayed contrast enhancement to irreversible injury, infarct age, and contractile function. *Circulation*, 1999, 100(19): 1992-2002.
- [5] PETERZAN MA, RIDER OJ, ANDERSON LJ. The role of cardiovascular magnetic resonance imaging in heart failure. *Card Fail Rev*, 2016, 2(2): 115-122.
- [6] AZARISMAN SM, CARBONE A, SHIRAZI M, *et al.* Characterisation of myocardial injury via T1 mapping in early reperfused myocardial infarction and its relationship with global and regional diastolic dysfunction. *Heart Lung Circ*, 2016, 25(11): 1094-1106.
- [7] LIU X, YANG ZG, GAO Y, *et al.* Left ventricular subclinical myocardial dysfunction in uncomplicated type 2 diabetes mellitus is associated with impaired myocardial perfusion: a contrast-enhanced cardiovascular magnetic resonance study. *Cardiovasc Diabetol*, 2018, 17(1): 139 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1186/s12933-018-0782-0>.
- [8] VO HQ, MARWICK TH, NEGISHI K. MRI-derived myocardial strain measures in normal subjects. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(2 Pt 1): 196-205.
- [9] KOOS R, ALTIOK E, DOETSCH J, *et al.* Layer-specific strain-encoded MRI for the evaluation of left ventricular function and infarct transmural extent in patients with chronic coronary artery disease. *Int J Cardiol*, 2013, 166(1): 85-89.
- [10] HINOJAR R, FERNANDEZ-GOLFIN C, GONZALEZ-GOMEZ A, *et al.* Prognostic implications of global myocardial mechanics in hypertrophic cardiomyopathy by cardiovascular magnetic resonance feature tracking. *Relations to left ventricular hypertrophy and fibrosis*. *Int J Cardiol*, 2017, 249: 467-472 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2017.07.087>.
- [11] CHIMURA M, ONISHI T, TSUKISHIRO Y, *et al.* Longitudinal strain combined with delayed-enhancement magnetic resonance improves risk stratification in patients with dilated cardiomyopathy. *Heart*, 2017, 103(9): 679-686.
- [12] KIDO T, NAGAO M, KIDO T, *et al.* Stress/rest circumferential strain in non-ischemia, ischemia, and infarction—quantification by 3 Tesla tagged magnetic resonance imaging. *Circ J*, 2013, 77(5): 1235-1241.
- [13] 王哲涛, 王春华, 陈翰舒, 等. MRI 组织追踪技术在心脏淀粉样变性中的应用. *四川大学学报(医学版)*, 2019, 50(4): 466-470.
- [14] 朱 静, 朱 桐, 张 钰, 等. 心脏磁共振组织追踪 2D 与 3D 应变评估实验性自身免疫性心肌炎模型大鼠的诊断价值及可重复性研究. *四川大学学报(医学版)*, 2019, 50(4): 471-477.
- [15] 王 磊, 朱 静, 朱 桐, 等. 7T 心脏磁共振二维组织追踪技术评价树鼯心功能的应用研究. *四川大学学报(医学版)*, 2019, 50(4): 478-482.
- [16] DI MARCO A, ANGUERA I, SCHMITT M, *et al.* Late gadolinium enhancement and the risk for ventricular arrhythmias or sudden death in dilated cardiomyopathy: systematic review and meta-analysis. *JACC Heart Fail*, 2017, 5(1): 28-38.
- [17] WENG Z, YAO J, CHAN RH, *et al.* Prognostic value of LGE-CMR in HCM: a meta-analysis. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(12): 1392-1402.
- [18] KIM RJ, CHEN EL, LIMA JA, *et al.* Myocardial Gd-DTPA kinetics determine MRI contrast enhancement and reflect the extent and severity of myocardial injury after acute reperfused infarction. *Circulation*, 1996, 94(12): 3318-3326.
- [19] PATEL H, MAZUR W, WILLIAMS KA, *et al.* Myocardial viability-state of the art: is it still relevant and how to best assess it with imaging? *Trends Cardiovasc Med*, 2018, 28(1): 24-37.
- [20] HUNOLD P, SCHLOSSER T, VOGT FM, *et al.* Myocardial late enhancement in contrast-enhanced cardiac MRI: distinction between infarction scar and non-infarction-related disease. *AJR Am J Roentgenol*, 2005, 184(5): 1420-1426.
- [21] BENITO EM, CABANELAS N, NUNEZ-GARCIA M, *et al.* Preferential regional distribution of atrial fibrosis in posterior wall around left inferior pulmonary vein as identified by late gadolinium enhancement cardiac magnetic resonance in patients with atrial fibrillation. *Europace*, 2018, 20(12): 1959-1965.
- [22] 程 巍, 王思梦, 何 帅, 等. MOCO-PSIR 在扩张型心肌病心肌纤维化瘢痕评价中的应用价值. *四川大学学报(医学版)*, 2019, 50(4): 483-488.
- [23] OSHINSKI JN, YANG Z, JONES JR, *et al.* Imaging time after Gd-DTPA injection is critical in using delayed enhancement to determine infarct size accurately with magnetic resonance imaging. *Circulation*, 2001, 104(23): 2838-2842.
- [24] DALL'ARMELLINA E, KARIA N, LINDSAY AC, *et al.* Dynamic changes of edema and late gadolinium enhancement after acute myocardial infarction and their relationship to functional recovery and salvage index. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2011, 4(3): 228-236.
- [25] KIDAMBI A, MOTWANI M, UDDIN A, *et al.* Myocardial extracellular volume estimation by CMR predicts functional recovery following acute MI. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(9): 989-999.
- [26] 夏 睿, 朱 桐, 张 钰, 等. 心肌梗死再灌注早期磁共振心肌应变的初步研究. *四川大学学报(医学版)*, 2019, 50(4): 489-493.
- [27] SERAPHIM A, KNOTT KD, AUGUSTO J, *et al.* Quantitative cardiac MRI. *J Magn Reson Imaging*, 2019 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1002/jmri.26789>.
- [28] MOON JC, MESSROGLHI 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 Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15: 92 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1186/1532-429x-15-92>.
- [29] MAESTRINI V, TREIBEL TA, WHITE SK, *et al*. T1 mapping for characterization of intracellular and extracellular myocardial diseases in heart failure. *Curr Cardiovasc Imaging Rep*, 2014(7): 9287 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1007/s12410-014-9287-8>.
- [30] VAN OORSCHOT JW, EL AIDI H, JANSEN OF LORKEERS SJ, *et al*. Endogenous assessment of chronic myocardial infarction with T(1rho)-mapping in patients. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2014, 16: 104 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1186/s12968-014-0104-y>.
- [31] WANG C, ZHENG J, SUN J, *et al*. Endogenous contrast T1rho cardiac magnetic resonance for myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy patients. *J Cardiol*, 2015, 66 (6): 520-526.
- [32] ZHANG Y, ZENG W, CHEN W, *et al*. MR extracellular volume mapping and non-contrast T1rho mapping allow early detection of myocardial fibrosis in diabetic monkeys. *Eur Radiol*, 2019, 29(6): 3006-3016.
- [33] TESSA C, DEL MEGGIO J, LILLI A, *et al*. T1 and T2 mapping in the identification of acute myocardial injury in patients with NSTEMI. *Radiol Med*, 2018, 123 (12): 926-934.
- [34] NASSENSTEIN K, NENSA F, SCHLOSSER T, *et al*. Cardiac MRI: T2-mapping versus T2-weighted dark-blood TSE imaging for myocardial edema visualization in acute myocardial infarction. *Rofo*, 2014, 186(2): 166-172.
- [35] BULLUCK H, WHITE SK, ROSMINI S, *et al*. T1 mapping and T2 mapping at 3T for quantifying the area-at-risk in reperfused STEMI patients. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2015, 17: 73 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1186/s12968-015-0173-6>.
- [36] BAESSLER B, LUECKE C, LURZ J, *et al*. Cardiac MRI texture analysis of T1 and T2 maps in patients with infarctlike acute myocarditis. *Radiology*, 2018, 289 (2): 357-365.
- [37] THAVENDIRANATHAN P, WALLS M, GIRI S, *et al*. Improved detection of myocardial involvement in acute inflammatory cardiomyopathies using T2 mapping. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2012, 5(1): 102-110.
- [38] KRITTAYAPHONG R, ZHANG S, SAIVIROONPORN P, *et al*. Assessment of cardiac iron overload in Thalassemia with MRI on 3.0-T: high-field T1, T2, and T2 * quantitative parametric mapping in comparison to T2 * on 1.5-T. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(4): 752-754.
- [39] BARRERA CA, OTERO HJ, HARTUNG HD, *et al*. Protocol optimization for cardiac and liver iron content assessment using MRI: what sequence should I use? *Clin Imaging*, 2019, 56: 52-57 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2019.02.012>.
- [40] CHEN W, ZHANG B, XIA R, *et al*. T2 mapping at 7T MRI can quantitatively assess intramyocardial hemorrhage in rats with acute reperfused myocardial infarction *in vivo*. *J Magn Reson Imaging*, 2016, 44(1): 194-203.
- [41] LIAO PA, LIN G, TSAI SY, *et al*. Myocardial triglyceride content at 3 T cardiovascular magnetic resonance and left ventricular systolic function: a cross-sectional study in patients hospitalized with acute heart failure. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18: 9 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1186/s12968-016-0228-3>.
- [42] KOROSOGLOU G, HUMPERT PM, AHRENS J, *et al*. Left ventricular diastolic function in type 2 diabetes mellitus is associated with myocardial triglyceride content but not with impaired myocardial perfusion reserve. *J Magn Reson Imaging*, 2012, 35(4): 804-811.
- [43] CHEN BH, SHI RY, AN DA, *et al*. BOLD cardiac MRI for differentiating reversible and irreversible myocardial damage in ST segment elevation myocardial infarction. *Eur Radiol*, 2019, 29(2): 951-962.
- [44] NAGAO M, YAMASAKI Y, KAWANAMI S, *et al*. Quantification of myocardial oxygenation in heart failure using blood-oxygen-level-dependent T2 * magnetic resonance imaging: comparison with cardiopulmonary exercise test. *Magn Reson Imaging*, 2017, 39: 138-143 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2017.02.005>.
- [45] ZHANG H, GROPLER RJ, LI D, *et al*. Assessment of myocardial oxygen extraction fraction and perfusion reserve with BOLD imaging in a canine model with coronary artery stenosis. *J Magn Reson Imaging*, 2007, 26(1): 72-79.
- [46] MCCOMMIS KS, ZHANG H, GOLDSTEIN TA, *et al*. Myocardial blood volume is associated with myocardial oxygen consumption: an experimental study with cardiac magnetic resonance in a canine model. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2009, 2(11): 1313-1320.
- [47] ALVES JR, DE QUEIROZ RAB, BAR M, *et al*. Simulation of the perfusion of contrast agent used in cardiac magnetic resonance: a step toward non-invasive cardiac perfusion quantification. *Front Physiol*, 2019, 10: 177 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00177>.
- [48] ZORACH B, SHAW PW, BOURQUE J, *et al*. Quantitative cardiovascular magnetic resonance perfusion imaging identifies reduced flow reserve in microvascular coronary artery disease. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20 (1): 14 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1186/s12968-018-0435-1>.
- [49] BAESSLER B, MANNIL M, MAINTZ D, *et al*. Texture analysis and machine learning of non-contrast T1-weighted MR images in patients with hypertrophic cardiomyopathy-preliminary results. *Eur J Radiol*, 2018, 102: 61-67 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.03.013>.
- [50] SHAO XN, SUN YJ, XIAO KT, *et al*. Texture analysis of magnetic resonance T1 mapping with dilated cardiomyopathy: a machine learning approach. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97 (37): e12246 [2019-03-18]. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000012246>.
- [51] 吴 韬, 孙怀强, 刘秀民, 等. 健康志愿者心肌磁共振纹理特征初探. *四川大学学报(医学版)*, 2019, 50(4): 494-499.

(2019-04-28 收稿, 2019-05-20 修回)

编辑 吕 熙