

心脏磁共振在左心房评价中的临床应用与研究进展

石美晶, 费宇杰, 陶静雯, 杨朝霞, 李浩杰, 林立

【摘要】 左心房的结构和功能异常是心血管疾病的重要预后因素。心脏磁共振(CMR)作为一种无创性检查方法,具有较高的空间、时间分辨率及可重复性高等优势,已成为评估左心房结构和功能的金标准。心脏磁共振特征跟踪(CMR-FT)技术可以早期识别左心房的功能障碍,钆延迟强化(LGE)技术及 T_1 -mapping 技术可以综合评估左心房纤维化,在评估左心房功能和协助诊断方面十分重要。虽然 CMR 新技术的应用越来越广泛,但依然存在一定的局限性。本文对心脏磁共振在左心房的临床应用与研究进展进行综述。

【关键词】 左心房; 心脏磁共振; 容积; 功能; 纤维化

【中图分类号】 R541; R445.2 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2021)01-0128-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2021.01.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



左心房在心脏功能中发挥着不可或缺的作用。左心房大小、容积、结构及功能等方面的研究对不同心脏病患者的诊断与治疗具有重要的临床意义^[1]。超声心动图是临床上最常用的检查方法,具有使用简单、安全、快速、经济等优势,但其声窗较小,基于几何假设的测量误差,图像质量不佳,并且操作者依赖性很强。心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)作为一种无创、无辐射、一站式影像学检查技术^[2],与超声心动图相比,CMR 在评价左心房结构与功能方面具有以下优势:①对左心房大小、容积及功能测量具有更高的可靠性与可重复性^[3];②通过心脏磁共振特征追踪(cardiac magnetic resonance-feature tracking, CMR-FT)技术能够量化心肌应变,早期识别出左心房结构及功能的变化^[4];③利用钆延迟强化(late gadolinium enhancement, LGE)成像^[5]及 T_1 -mapping 技术^[6]可定性并定量检测左心房心肌纤维化。本文对 CMR 在左心房的临床应用与研究进展进行综述。

左心房容积

很多研究表明,左心房不仅是左心室充盈的渠道,其大小和重构也可作为评估疾病严重程度的一个重要标志,左心房容积(left atrial volume, LAV)变化可独立预测房颤、全身血栓栓塞事件和心力衰竭等不良心血管事件的长期临床结果^[7]。临床实践中, LAV 测量较左房直径测量能更加准确地评估左心房重构。因此,准确和可重复测量左心房大小和容积十分重要。

近年来,CMR 作为一种无创成像方法,广泛应用于心脏结构及功能的评价与研究中。CMR 基于稳态自由进动(steady-state free precession, SSFP)序列,呼气末屏气,采用回顾性心电门控扫描,获得长轴电影(二腔心、三腔心、四腔心)及短轴电影图像,通过专业后处理软件,手动或半自动勾画左心房心内膜,将左心耳及肺静脉根部排除在外,从而计算获得左心房容积参数^[3]。

最近的一项大型多中心研究结果显示,健康受试者的 LAV 正常参考范围为 (36.3 ± 7.8) mL/ m^2 (不包括左心房附件), LAV 逐渐增大会增加全因死亡率的风险^[8]。CMR 测得的 LAV 较超声心动图测得的体积更大,正常参考值男性为 $26 \sim 53$ mL/ m^2 , 女性为 $27 \sim 52$ mL/ m^2 ^[3]。虽然很多研究支持采用左心房最大容积评估心血管疾病风险,但也有研究认为左心房最小容积可能是重要的预后评估指标^[9]。LAV 由多种因素决定,包括左心室顺应性、左心房收缩力、左心房与左心室之间的压力梯度和左心房心肌壁的状态等。左心室舒张压升高时可导致左心房扩大,左心房大小反映了舒张期充盈压升高的持续时间和严重程度^[10]。在没有房颤和二尖瓣疾病的患者中,左心房扩大是左心室充盈压力长期升高的标志^[1]。

左心房功能

左心房在调节左心室充盈及维持心血管正常功能中发挥着重要作用,在整个心动周期中,左心房主要功能包括三个方面:①储存功能。心室收缩期,肺静脉血液回流并储存;②管道功能。心室舒张早期,在左心房与左心室压力阶差下,肺静脉血液被动进入左心室;③泵功能。心室舒张晚期,左心房主动收缩增强心室充

作者单位: 430010 武汉,长江航运总医院急诊内科(石美晶); 430030 武汉,华中科技大学同济医学院附属同济医院心血管内科(费宇杰,陶静雯,林立),放射科(杨朝霞,李浩杰)

作者简介: 石美晶(1988—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,住院医师,主要从事心血管病影像诊断及研究工作。

通信作者: 林立, E-mail: linlee271227@163.com

盈^[11,12]。左心房的储存功能和管道功能均由左心房心肌顺应性和左心室纵向位移决定,而左心房收缩功能在更大程度上是由左心室收缩压力决定的^[13]。左心房功能受损与不同心血管疾病的主要不良心脏事件相关^[14,15]。

心肌应变表示心肌整体及节段的形变,应变率指心肌发生形变的速度,即单位时间内发生的应变,能更准确、更敏感地反映心肌早期功能受损。近年来,心肌应变研究已成为 CMR 领域的研究热点之一。CMR-FT 技术是一种近年来发展起来的快速定量评估心肌应变的新型技术,仅需使用心脏电影序列在心动周期中追踪心内膜和心外膜即可获取心脏整体和局部的多种应变参数,可能是检测心肌应变的首选方法^[16]。左心房心肌壁较薄,CMR 可提供较高的空间分辨率及优良的对比度,因此更有利于左心房功能分析^[17,18]。近年来,很多研究证明 CMR-FT 在左心房应变和应变率测量中具有较高的准确性和重复性^[19,20]。虽然 CMR-FT 应用越来越广泛,但作为一个仍在发展的技术,依然存在一些局限性,如应力计算受像素窗大小的限制、存在层间运动伪影及不同厂家分析软件的应变值标准化问题等^[21];此外,目前尚无完全标准化的图像采集方法,导致图像质量的变化可能会影响应变测量的准确性^[22]。

左心房纤维化

左心房纤维化(left atrial fibrosis, LAF)可发生于多种心血管疾病中,LAF 可能导致房颤患者的电传导异常及折返通路中断^[1]。LAF 可在多种生理机制下发生,如衰老、血流动力学紊乱、伴有心律失常的左心房不适当收缩等。此外,LAF 被认为是一种在炎症、心肌牵拉或超负荷的情况下发生的不可逆转的左心房重构形式^[23]。

LGE 技术是一种评估心肌瘢痕及局灶性心肌纤维化最好的非侵入性方法,被当作评估心肌损伤的参考标准^[5]。钆对比剂是一种水溶性物质,分布于细胞外间隙,心肌纤维化存在时,钆对比剂积聚增多,使得纤维化组织强化呈高信号^[24]。起初,Peters 等^[25]对 LGE 技术进行改进,使之用于左心房纤维化(LAF)的可视化分析。近年来,Utah 研究团队的大量研究工作使得 LA-LGE 评估得到很大提高,并建立了可反映左心房重构的分期系统^[26]。一项纳入超过 200 例患者的大型多中心研究(DECAAF 研究)^[27],根据纤维化组织占整个心房组织的百分比分为 I—IV 期:I 期,纤维化程度 $<10\%$;II 期,纤维化程度为 $10\% \sim 20\%$;III 期,纤维化程度为 $20\% \sim 30\%$;IV 期,纤维化程度 $>30\%$ 。LA-LGE 技术仍面临很多挑战,如需设置良好

的心电及呼吸门控、适当调整反转恢复时间、后处理及分割耗时、定义强化区域阈值并去除潜在伪影等。因此,LA-LGE 技术尽管具有良好的研究前景,目前在临床实践中仍未得到广泛应用^[28-30]。

LGE 技术依赖于纤维化心肌与正常心肌之间的信号差异,因此,不适用于弥漫性心肌纤维化的检测。 T_1 -mapping 技术即纵向弛豫时间定量成像技术,利用反转或饱和恢复脉冲进行激发,经过一系列反转时间或饱和时间多次采集磁共振信号,进行运动校正配准并基于图像的信号强度进行后处理,从而直接定量心肌的 T_1 值^[6]。相关组织学研究发现 LAF 通常以区域性模式弥漫性分布^[31],因此,准确并敏感测量 LAF 十分重要。 T_1 -mapping 技术能够检测并量化心肌弥漫性纤维化^[32]。新型的三维高分辨率 T_1 -mapping 技术效率高,准确性好,能够实现左心房薄壁心肌的 T_1 值测量^[33]。

CMR 在左心房评估中的临床应用及研究进展

1. 心房颤动

心房颤动(atrial fibrillation, AF)是临床上最常见的心律失常,与显著的心血管疾病的发病率和死亡率相关^[34]。左心房扩张与 LAF 导致左心房功能障碍及电生理异常,是 AF 发生的基础^[35]。对于选择消融患者,充分评估 LAV 十分重要。一项前瞻性研究发现 AF 患者消融前 LAV 评估似乎是一个术后长期成功的预测因素^[36]。Pontone 等^[37]研究表明,CMR 测量的 LAV 是射频导管消融术(radiofrequency catheter ablation, RFCA)后 AF 复发最可靠的独立性预测因子。相关研究发现药物治疗可改善左心房的大小和功能,减小 LAV 有可能成为未来的治疗靶点^[38]。

左心房功能降低与 AF 风险增加有关。Habibi 等^[39]研究发现左心房储存功能与肺静脉隔离(pulmonary vein antrum isolation, PVAI)术后 AF 复发独立相关,并且可改进 PVAI 术后风险分层。诸多研究表明,左心房应变在多种心血管疾病评估中具有更高的诊断和预后价值^[40]。一项 Meta 分析研究发现,左心房应变分析对于识别 AF 术后复发的高风险患者有很大帮助^[41]。另一项关于 CMR-FT 评价 AF 患者 RFCA 对左心功能影响的 meta 分析研究显示,圆周应变相对于长轴应变在测量上有更好的可重复性^[42]。

AF 与弥漫性 LAF 及心内膜电压降低相关,LAF 变化是 AF 严重程度的指标,可用于 AF 患者临床诊治及预后评估^[43]。LGE 技术越来越多地用于 AF 患者消融术前预测、术后消融病灶的评估及消融策略的选择^[44]。相关研究发现 LAV 似乎比 AF 类型更能有效预测 PVAI 术后的 AF 复发率^[45]。DECAAF 研究

证明 LAF 严重程度对 RFCA 治疗 AF 的疗效有显著影响, LAF 越严重, AF 复发率越高且复发时间越早^[27]。LAF 每增加 1%, 随访期间心律失常的复发风险升高 6%, 因此在选择 AF 患者消融术前应评估并考虑纤维化负荷。Siebermair 等^[46]研究显示 LAF 程度较高的非 AF 患者发生 AF 的风险增加, 在接受消融治疗的 AF 患者中, 术前 LAF 与复发性心律失常的可能性独立相关。LAF 程度及分布与 AF 患者消融治疗的预后和治疗结果有关^[47]。LGE 显示 AF 患者左心房后壁和左下肺静脉周围 LAF 发生率更高, 局限于左下肺静脉周围的局灶性延迟强化、更广泛的强化程度和较大的 LAV 体积与持续性房颤独立相关^[24]。近年来相关研究发现 LAF 量化对 AF 患者选择合适的治疗方式很有帮助。Beinart 等^[48]研究发现 AF 患者与正常人相比, CMR 测量的左心房增强后 T_1 (post- T_1) 值更低, 并且与左心房组织电压相关。Ling 等^[49]研究发现 AF 患者 post- T_1 值低于 230 ms 与更高的 AF 复发率相关, 可作为评估左心房弥漫性纤维化程度的指标。Luetkens 等^[50]研究发现 AF 复发患者左心房 T_1 值和 LGE 阳性百分比均显著升高, 这两个参数是消融治疗后不良预后的独立预测因子。

2. 肥厚型心肌病

左心房大小对肥厚型心肌病 (hypertrophic cardiomyopathy, HCM) 的预后评估及危险分层具有重要意义, 最近的欧洲指南已经将左心房直径纳入分层风险模型, 以预测 HCM 患者 5 年的心脏性猝死风险^[51]。Losi 等^[52]研究发现 HCM 患者随着 LAV 增大, 猝死、心衰及心脏停搏的风险增加。Debonnaire 等^[53]发现 HCM 患者左心房扩大并且左房功能减低。Hinojar 等^[51]研究表明 CMR-FT 测量的左房长轴应变与 HCM 的心血管死亡率和心力衰竭有关, 可能成为一种预测不良心脏结局的新指标。Williams 等^[54]研究显示 HCM 患者较健康对照组 LAV 明显增加, 而左心房射血分数及应变参数值明显降低, 尤其在左室流出道梗阻患者中更显著, 而室间隔部分切除术患者的 LAV 及左心房功能得到了明显改善。因此, CMR-FT 技术可通过测量左心房应变评估 HCM 梗阻严重程度, 同时可评价梗阻性 HCM 患者室间隔部分切除术的疗效。Latif 等^[55]研究发现 HCM 患者 LAF 十分常见, 并与左心室纤维化程度相关, LAF 可能是左心室重塑所致。

3. 高血压

左房大小反映左室舒张期充盈压力增加的持续时间和严重程度, 高血压患者左心房结构及功能变化的病理生理机制主要归因于舒张期心室压力不断升高, 使左心房储存功能减低^[56]。Li 等^[57]通过 CMR-FT

定量检测高血压患者左心房形变及容积参数, 发现高血压患者左心房存储功能及管道功能受损, 并且可在进展为左心室肥厚之前进行早期检测, 而不伴有左心室肥厚的高血压患者其左心房泵功能相对正常。Kaminski 等^[58]研究发现在具有左心室舒张功能障碍风险的高血压患者中, 左心房收缩功能降低是不良心脏事件和死亡的强烈预测因子。

4. 心力衰竭

左心房大小是心力衰竭 (heart failure, HF) 的预测因素^[59]。左心房容积和功能的恶化可先于 HF 的进展, Habibi 等^[60]通过 CMR-FT 测量左心房容积及应变参数, 发现无明显心血管症状的患者进展为 HF 之前左心房整体纵向峰值应变值更低, 左心房最小容积指数更高, 整体纵向峰值应变 $< 14\%$ 的患者最终出现了 HF, 表明左心房纵向应变的变化有助于独立预测 HF。

5. 糖尿病

糖尿病 (diabetes mellitus, DM) 通常与心血管疾病共存, 与左心房结构及功能变化相关。相关研究证明, DM 与早期心脏重构如左心房扩大相关^[61], LAV 可独立预测 DM 患者的全因死亡率^[62]。Markman 等^[63]研究表明, 在无症状性心血管疾病的 DM 患者中, 左心房扩大尤其是左心房最小容积增加及左心房功能降低, 与心血管事件的发展相关。

综上所述, 多模态 CMR 作为一种无辐射的一站式检查方法, 不仅能够综合评估患者左心房结构和功能的异常改变, 还能无创表征心肌组织学特性; 但 CMR 多种技术均受场强、序列、心率甚至心肌节段等多种因素的影响, 在肌壁薄弱的左心房的临床应用仍处于探索阶段。未来仍需要大规模的研究以进一步实现 CMR 对左心房更加精准的评估, 为心脏疾病早期诊断、风险分级及预后评估提供更多有价值的信息。

参考文献:

- [1] Panovsky R, Pleva M, Feitova V, et al. Left atrium assessment: the evolving role of MRI[J]. J Cardiovasc Med, 2015, 16(10): 671-680.
- [2] von Knobelsdorff-Brenkenhoff F, Pilz G, Schulz-Menger J. Representation of cardiovascular magnetic resonance in the AHA/ACC guidelines[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2017, 19(1): 70.
- [3] Maceira AM, Cosin-Sales J, Roughton M, et al. Reference left atrial dimensions and volumes by steady state free precession cardiovascular magnetic resonance[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2010, 12(1): 65.
- [4] Truong VT, Palmer C, Wolking S, et al. Normal left atrial strain and strain rate using cardiac magnetic resonance feature tracking in healthy volunteers[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2020, 21(4): 446-453.
- [5] Panovsky R, Pleva M, Feitova V, et al. The prognostic impact of myocardial late gadolinium enhancement[J]. Cardiol Rev, 2014, 22

- (3);128-139.
- [6] 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.
 - [7] Elliott PM, Anastasakis A, Borger MA, et al. 2014 ESC Guidelines on diagnosis and management of hypertrophic cardiomyopathy[J]. Kardiol Pol, 2014, 72(11):1054-1126.
 - [8] Zghaib T, Ipek EG, Zahid S, et al. Association of left atrial epicardial adipose tissue with electrogram bipolar voltage and fractionation: electrophysiologic substrates for atrial fibrillation[J]. Heart Rhythm, 2016, 13(12):2333-2339.
 - [9] Chamsi-Pasha MA, Zhan Y, Debs D, et al. CMR in the evaluation of diastolic dysfunction and phenotyping of HFpEF: current role and future perspectives[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(1):283-296.
 - [10] Leung DY, Boyd A, Ng AA, et al. Echocardiographic evaluation of left atrial size and function: current understanding, pathophysiologic correlates, and prognostic implications[J]. Am Heart J, 2008, 156(6):1056-1064.
 - [11] Hoit BD. Left atrial size and function: role in prognosis[J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 63(6):493-505.
 - [12] Blume GG, Mcleod CJ, Barnes ME, et al. Left atrial function: physiology, assessment, and clinical implications[J]. Eur J Echocardiogr, 2011, 12(6):421-430.
 - [13] Donal E, Behagel A, Feneon D. Value of left atrial strain: a highly promising field of investigation[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2015, 16(4):356-357.
 - [14] Kaminski M, Steel K, Jeroschherold M, et al. Strong cardiovascular prognostic implication of quantitative left atrial contractile function assessed by cardiac magnetic resonance imaging in patients with chronic hypertension[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2011, 13(1):42.
 - [15] Lonborg JT, Engstrom T, Moller JE, et al. Left atrial volume and function in patients following ST elevation myocardial infarction and the association with clinical outcome: a cardiovascular magnetic resonance study[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2013, 14(2):118-127.
 - [16] Mangion K, McComb C, Auger DA, et al. Magnetic resonance imaging of myocardial strain after acute ST-segment-elevation myocardial infarction: a systematic review[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2017, 10(8):e006498.
 - [17] Schuster A, Hor KN, Kowallick JT, et al. Cardiovascular magnetic resonance myocardial feature tracking: concepts and clinical applications[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2016, 9(4):e004077.
 - [18] Pedrizzetti G, Claus P, Kilner PJ, et al. Principles of cardiovascular magnetic resonance feature tracking and echocardiographic speckle tracking for informed clinical use[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2016, 18(1):51.
 - [19] Kowallick JT, Morton G, Lamata P, et al. Quantification of atrial dynamics using cardiovascular magnetic resonance: inter-study reproducibility[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2015, 17(1):36.
 - [20] Zareian M, Ciuffo L, Habibi M, et al. Left atrial structure and functional quantitation using cardiovascular magnetic resonance and multimodality tissue tracking: validation and reproducibility assessment[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2015, 17(1):52.
 - [21] Claus P, Omar AMS, Pedrizzetti G, et al. Tissue tracking technology for assessing cardiac mechanics: principles, normal values, and clinical applications[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2015, 8(12):1444.
 - [22] Erley J, Genovese D, Tapaskar N, et al. Echocardiography and cardiovascular magnetic resonance based evaluation of myocardial strain and relationship with late gadolinium enhancement[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2019, 21(1):46.
 - [23] Lee DK, Shim J, Choi J. Left atrial fibrosis assessed with cardiac MRI in patients with paroxysmal and those with persistent atrial fibrillation[J]. Radiology, 2019, 292(3):575-582.
 - [24] Mahnkopf C, Badger TJ, Burgon NS, et al. Evaluation of the left atrial substrate in patients with lone atrial fibrillation using delayed-enhanced MRI: implications for disease progression and response to catheter ablation[J]. Heart Rhythm, 2010, 7(10):1475-1481.
 - [25] Peters DC, Wylie JV, Hauser TH, et al. Detection of pulmonary vein and left atrial scar after catheter ablation with three-dimensional navigator-gated delayed enhancement MR imaging: initial experience[J]. Radiology, 2007, 243(3):690-695.
 - [26] Higuchi K, Akkaya M, Akoum N, et al. Cardiac MRI assessment of atrial fibrosis in atrial fibrillation: implications for diagnosis and therapy[J]. Heart, 2014, 100(7):590-596.
 - [27] Marrouche NF, Wilber D, Hindricks G, et al. Association of atrial tissue fibrosis identified by delayed enhancement MRI and atrial fibrillation catheter ablation: the DECAAF study[J]. JAMA, 2014, 311(5):498-506.
 - [28] Habibi M, Lima JAC, Ipek EG, et al. The association of baseline left atrial structure and function measured with cardiac magnetic resonance and pulmonary vein isolation outcome in patients with drug refractory atrial fibrillation[J]. Heart Rhythm, 2016, 13(5):1037-1044.
 - [29] Khurram IM, Beinart R, Zipunnikov V, et al. Magnetic resonance image intensity ratio, a normalized measure to enable interpatient comparability of left atrial fibrosis[J]. Heart Rhythm, 2014, 11(1):85-92.
 - [30] Sramko M, Peichl P, Wichterle D, et al. Clinical value of assessment of left atrial late gadolinium enhancement in patients undergoing ablation of atrial fibrillation[J]. Int J Cardiol, 2015, 179(1):351-357.
 - [31] de Oliveira M, Oliveira BD, Scanavacca MI, et al. Fibrosis, myocardial crossings, disconnections, abrupt turns, and epicardial reflections: do they play an actual role in human permanent atrial fibrillation? A controlled necropsy study[J]. Cardiovasc Pathol, 2013, 22(1):65-69.
 - [32] Mewton N, Liu CY, Croisille P, et al. Assessment of myocardial fibrosis with cardiovascular magnetic resonance[J]. J Am Coll Cardiol, 2011, 57(8):891-903.
 - [33] Hu C, Sinusas AJ, Huber S, et al. T₁-refBlochi: high resolution 3D post-contrast T₁ myocardial mapping based on a single 3D late gadolinium enhancement volume, Bloch equations, and a reference T₁[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2017, 19(1):63.
 - [34] January CT, Wann LS, Alpert JS, et al. 2014 AHA/ACC/HRS guideline for the management of patients with atrial fibrillation: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Heart

- Rhythm Society[J].Circulation,2014,130(23):2071-2104.
- [35] Delgado V,Di Biase L,Leung M,et al.Structure and function of the left atrium and left atrial appendage AF and stroke implications[J].J Am Coll Cardiol,2017,70(25):3157-3172.
- [36] Curta A,Fichtner S,Wakili R,et al.Prospective evaluation of left atrial function and late gadolinium enhancement with 3.0T MRI in patients with atrial fibrillation before and after catheter ablation[J].Int J Cardiovasc Imaging,2019,35(3):499-504.
- [37] Pontone G,Andreini D,Bertella E,et al.Comparison of cardiac computed tomography versus cardiac magnetic resonance for characterization of left atrium anatomy before radiofrequency catheter ablation of atrial fibrillation[J].Int J Cardiol,2015,179(1):114-121.
- [38] Kebed KY,Addetia K,Lang RM.Importance of the left atrium; more than a bystander? [J].Heart Fail Clin,2019,15(2):191-204.
- [39] Habibi M,Lima J,Gucuk IE,et al.The association of baseline left atrial structure and function measured with cardiac magnetic resonance and pulmonary vein isolation outcome in patients with drug-refractory atrial fibrillation [J].Heart Rhythm,2016,13(5):1037-1044.
- [40] Morris DA,Belyavskiy E,Aravind-Kumar R,et al.Potential usefulness and clinical relevance of adding left atrial strain to left atrial volume index in the detection of left ventricular diastolic dysfunction[J].JACC Cardiovasc Imaging,2018,11(10):1405-1415.
- [41] Ma XX,Boldt LH,Zhang YL,et al.Clinical relevance of left atrial strain to predict recurrence of atrial fibrillation after catheter ablation; a meta-analysis[J].Echocardiography,2016,33(5):724-733.
- [42] Ceelen F,Hunter RJ,Boubertakh R,et al.Effect of atrial fibrillation ablation on myocardial function: insights from cardiac magnetic resonance feature tracking analysis[J].Int J Cardiovasc Imaging,2013,29(8):1807-1817.
- [43] Oakes RS,Badger TJ,Kholmovski EG,et al.Detection and quantification of left atrial structural remodeling with delayed-enhancement magnetic resonance imaging in patients with atrial fibrillation[J].Circulation,2009,119(13):1758-1767.
- [44] Zghaib T,Nazarian S.New insights into the use of cardiac magnetic resonance imaging to guide decision making in atrial fibrillation management[J].Can J Cardiol,2018,34(11):1461-1470.
- [45] Costa FM,Ferreira AM,Oliveira S,et al.Left atrial volume is more important than the type of atrial fibrillation in predicting the long-term success of catheter ablation[J].Int J Cardiol,2015,184(1):56-61.
- [46] Siebermair J,Suksaranjit P,McGann CJ,et al.Atrial fibrosis in non-atrial fibrillation individuals and prediction of atrial fibrillation by use of late gadolinium enhancement magnetic resonance imaging[J].J Cardiovasc Electrophysiol,2019,30(4):550-556.
- [47] Siebermair J,Kholmovski EG,Marrouche N.Assessment of left atrial fibrosis by late gadolinium enhancement magnetic resonance imaging: methodology and clinical implications[J].JACC Clin Electrophysiol,2017,3(8):791-802.
- [48] Beinart R,Khurram IM,Liu S,et al.Cardiac magnetic resonance T₁-mapping of left atrial myocardium[J].Heart Rhythm,2013,10(9):1325-1331.
- [49] Ling LH,McLellan AJ,Taylor AJ,et al.Magnetic resonance post-contrast T₁-mapping in the human atrium; validation and impact on clinical outcome after catheter ablation for atrial fibrillation [J].Heart Rhythm,2014,11(9):1551-1559.
- [50] Luetkens JA,Wolpers AC,Biert T,et al.Cardiac magnetic resonance using late gadolinium enhancement and atrial T₁-mapping predicts poor outcome in patients with atrial fibrillation after catheter ablation therapy[J].Sci Rep,2018,8(1):13618.
- [51] Hinojar R,Zamorano JL,Fernandez-Mendez M,et al.Prognostic value of left atrial function by cardiovascular magnetic resonance feature tracking in hypertrophic cardiomyopathy[J].Int J Cardiovasc Imaging,2019,35(6):1055-1065.
- [52] Losi MA,Betocchi S,Barbati G,et al.Prognostic significance of left atrial volume dilatation in patients with hypertrophic cardiomyopathy[J].J Am Soc Echocardiogr,2009,22(1):76-81.
- [53] Debonnaire P,Joyce E,Hiemstra Y,et al.LA size and function versus AF risk in HCM[J].Circ Arrhythm Electrophys,2017,10(1):1-10.
- [54] Williams LK,Chan RH,Carasso S,et al.Effect of left ventricular outflow tract obstruction on left atrial mechanics in hypertrophic cardiomyopathy[J].Biomed Res Int,2015,2015:481245.
- [55] Latif SR,Nguyen VQ,Peters DC,et al.Left atrial fibrosis correlates with extent of left ventricular myocardial delayed enhancement and left ventricular strain in hypertrophic cardiomyopathy [J].Int J Cardiovasc Imaging,2019,35(7):1309-1318.
- [56] Miyoshi H,Oishi Y,Mizuguchi Y,et al.Early predictors of alterations in left atrial structure and function related to left ventricular dysfunction in asymptomatic patients with hypertension[J].J Am Soc Hypertens,2013,7(3):206-215.
- [57] Li L,Chen X,Yin G,et al.Early detection of left atrial dysfunction assessed by CMR feature tracking in hypertensive patients [J].Eur Radiol,2020,30(2):702-711.
- [58] Kaminski M,Steel K,Jeroschherold M,et al.Strong cardiovascular prognostic implication of quantitative left atrial contractile function assessed by cardiac magnetic resonance imaging in patients with chronic hypertension[J].J Cardiovasc Magn Reson,2011,13(1):42.
- [59] Rossi A,Temporelli PL,Quintana M,et al.Independent relationship of left atrial size and mortality in patients with heart failure: an individual patient meta-analysis of longitudinal data (MeRGE Heart Failure)[J].Eur J Heart Fail,2009,11(10):929-936.
- [60] Habibi M,Chahal H,Opdahl A,et al.Association of CMR-measured LA function with heart failure development: results from the MESA study[J].JACC Cardiovasc Imaging,2014,7(6):570-579.
- [61] From AM,Scott CG,Chen HH.Changes in diastolic dysfunction in diabetes mellitus over time[J].Am J Cardiol,2009,103(10):1463-1466.
- [62] Poulsen MK,Dahl JS,Henriksen JE,et al.Left atrial volume index; relation to long-term clinical outcome in type 2 diabetes[J].J Am Coll Cardiol,2013,62(25):2416-2421.
- [63] Markman TM,Habibi M,Venketash BA,et al.Association of left atrial structure and function and incident cardiovascular disease in patients with diabetes mellitus: results from multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA)[J].Eur Heart J Cardiovasc Imaging,2017,18(10):1138-1144.