

综述

心肌梗死后心脏损伤的影像学评估

苗雨桐¹, 沈 兰^{1,2}, 何 奔¹

1. 上海交通大学附属胸科医院, 上海 200030; 2. 上海交通大学医学院临床研究中心, 上海 200025

[摘要] 心肌梗死患者需要接受各类影像学检查, 对心脏损伤的程度进行评估, 以便筛查发生心血管事件的高危人群并判断患者预后, 从而更加高效地开展临床诊疗工作。心脏损伤的评估主要包括 2 个方面, 一是对心肌梗死后心室收缩功能和心脏解剖重构的整体评估, 二是针对梗死区域的面积、心肌活力以及微循环障碍的评估。目前, 临床上常用的影像学检查方法包括心脏超声、心脏磁共振、CT、核医学检查方法等。该文结合最新研究证据, 综述了各类影像学方法在评估心肌梗死后心脏损伤方面的最新应用, 为医务工作者临床实践提供参考。

[关键词] 心肌梗死; 心脏损伤; 影像学检查

[DOI] 10.3969/j.issn.1674-8115.2019.04.020 **[中图分类号]** R445 **[文献标志码]** A

Imaging evaluation of post-myocardial infarction injury

MIAO Yu-tong¹, SHEN Lan^{1,2}, HE Ben¹

1. Shanghai Chest Hospital, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Clinical Research Center, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China

[Abstract] Imaging techniques play a vital role in evaluating myocardial damage in patients with myocardial infarction. Accurate evaluations of post-infarction function and scar can help identify high-risk patients and provide prognosis information, which contributes much to clinical practice. The assessment of myocardial damage mainly includes overall evaluations of ventricular function and remodeling and targeted characterization of myocardial infarction including infarct size, myocardial viability and microvascular obstruction. Echocardiography, cardiac magnetic resonance, CT and nuclear examinations are most common imaging techniques currently. This review is to update evidence on applications of these modalities in evaluation of post-infarction myocardial damage and offer some helps to health workers.

[Key words] myocardial infarction; myocardial damage; image techniques

目前, 急性心肌梗死仍是全球性的健康问题。我国急性心肌梗死的发病率与病死率居高不下, 为国家卫生资源带来了巨大负担。心肌梗死后的影像学评估不仅可以帮助临床医师明确心脏功能, 而且可以辅助医师识别高危患者, 制定更加合适的诊疗计划。经胸超声心动图具有操作便捷、成本低廉等优点, 是目前使用最为广泛的检查方法, 但图像分辨率不佳。实时三维心脏超声、心肌声学造影 (myocardial contrast echocardiography, MCE) 以及斑点追踪超声心动图 (speckle tracking echocardiography, STE) 等可以在心肌结构与功能的评估方面提供更多信息。心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance imaging, CMR) 具有良好的组织分辨率和测量准确性, 能提供额外

的心肌组织学信息, 在识别心肌水肿、测量梗死面积、评估微循环障碍方面具有无可比拟的优势, 具有广阔的应用前景。此外, 核医学检查、CT 也能用于心脏功能的评估。近年来, 心肌梗死后心脏损伤的影像学评估领域又增添了许多新的证据。本文旨在总结最新的实践经验, 为临床工作者的临床实践提供参考。

1 心肌梗死后心室功能的评估

1.1 左心室收缩与舒张功能

1.1.1 收缩功能 目前左心室射血分数 (left ventricular ejection fraction, LVEF) 是最常用的评估心脏整体收缩功

[基金项目] 上海交通大学医学院多中心临床研究项目 (Dly201512) (Multi-Center Clinical Research Program of Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Dly201512)。

[作者简介] 苗雨桐 (1993—), 女, 博士生; 电子信箱: miaoyutong8128@163.com。

[通信作者] 何 奔, 电子信箱: drheben@126.com。



能的指标,常用的测量方法有心脏超声、CMR、同步单光子发射计算机断层扫描(single photon emission computed tomography, SPECT)。心脏超声是目前临床上最广泛使用的方法,虽然操作简单、高效,但重复性及测量准确性不佳。STE测量的整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)在预测心肌梗死患者全因死亡方面的作用优于LVEF^[1],同时也能评估左心室局部收缩功能障碍。CMR具有重复性好、图像分辨率高的优点,可替代心脏超声检查,作为评估LVEF的标准方法^[2];还能通过特殊的磁共振序列,采用心肌标记技术评估区域心肌功能^[3]。SPECT无需对心腔的几何形状作出假设,能更加准确地测量LVEF。CT测量的心室容积、射血分数与CMR测量的结果具有很好的一致性,并且优于二维与三维超声。

1.1.2 舒张功能 多普勒经胸超声心动图能通过二尖瓣血流频谱中的多个指标(包括二尖瓣口舒张早期E波的峰值流速、舒张晚期A波的峰值流速、E波减速时间等)估测左心室充盈压力,描述左心室舒张充盈的特征,评估心室的舒张功能^[4],但检查结果极易受到血流动力学变化的影响。STE可以通过局部心肌活动的应变进行舒张功能的定量评价^[5]。CMR不仅能提供血液流速和组织运动速度等指标,还能利用组织标记技术,精确量化左心室体积变化,可重复性高。目前,最新的T1 mapping技术也能间接评估心室舒张功能^[6]。

1.2 左心室扩张与重构

左心室扩张、重构与心肌梗死后的不良预后关系密切,左心室腔舒张末与收缩末容积能预测心肌梗死后不良事件的发生^[7]。左心室重构的概念,目前尚无明确的定义,可包括心腔扩大、心肌体积增加,以及心肌梗死后心室离心/同心肥大、瓣膜反流等。目前的评估方法主要有心脏超声、CMR和核医学检查。

心脏超声是首选的检查方法。在测量心腔几何形状方面,三维经胸心脏超声优于常规心脏超声^[8],并且对心腔容积的评估与CMR具有一致性。通过STE得到的心肌应变相关参数也可以预测左心室重构,但在分析室壁节段方面稍逊色于CMR^[9]。Hsiao等^[10]发现,二维STE可以预测射血分数保留的心肌梗死患者的左心室重构情况。

CMR不仅能精确评估左心室的质量与体积,还能通过晚期钆增强现象(late gadolinium enhancement, LGE)辨别顿抑心肌,同时提供关于瘢痕位置、梗死程度、透壁梗死的性质及微血管阻塞等方面的信息,这些指标均能预测左心室扩张以及病理性重构^[11]。

核医学检查也在评估中发挥一定作用。近期一项研究^[12]将SPECT与心电图检查相结合,提出了室壁增厚总评分(summed thickening score, STS)的新概念,并发现STS指数与左心室重构独立相关。正电子发射计算机断层显像技术(positron emission tomography, PET)能提供心肌缺血损伤后炎症反应的变化情况^[13],从而预测心室重构发生。多层螺旋CT检查具有无创、便捷、使用适用范围广的优点,也可评估心脏形态及功能,且测量结果与其他影像学检查数据具有很好的一致性^[14-15]。

1.3 右心室功能

右心室受累与急性心肌梗死患者院内死亡风险增加相关,是不良预后的独立预测因子。常规经胸超声心动图是目前应用最广的方法,但难以准确识别右心室复杂的解剖结构。三维超声心动图可以更加准确地鉴别出右心室功能障碍^[16]。STE可用于评估右心室壁节段收缩活动异常。一项纳入了135例急性心肌梗死患者的研究^[17]发现,STE测定的右心室整体纵向收缩期应变峰值与CMR测定的右心室射血分数具有很好的一致性。此外,放射性核素心肌显像能通过测定室壁运动积分指数(wall motion segment index, WMSI)评估右心室的收缩功能,与右心室射血分数具有很好的一致性^[18]。CT可以描述右心室壁区域运动的变化^[19]。

2 梗死区域特征的评估

2.1 梗死区域的测定和测量

心肌梗死后6周,梗死面积才达到相对稳定,在影像学检查评估梗死区域特征时应该考虑到这一点。①放射性同位素检测。SPECT检查利用梗死区域无相应的放射性信号这一特点,可以定量测定梗死面积。MCE通过梗死区域的造影剂回声减弱显像初步衡量梗死面积,且测量结果与CMR具有一定的相关性^[20]。研究^[21]发现,STE也能评估前壁心肌梗死患者的梗死面积。②CMR常用于评估心肌不可逆坏死的程度^[22]。人为划定的LGE范围的信号强弱可以量化梗死面积,但该方法过程繁琐,不同操作者间的异质性较大,当梗死灶周围存在难以界定的灰色区域时,测量准确性明显下降。有研究^[23]显示,采用半自动化方法进行LGE范围的划分,能进一步提高梗死面积测量的准确性与可重复性,但图像质量对测量结果的影响较大^[24]。③CT采用的碘造影剂与CMR的钆剂在梗死区域的动力学分布类似,因此同样可以利用延迟显像来检测梗死面积。虽然CT的图像对比度与分辨率不如CMR,但



仍能较为准确地判断急性、慢性梗死区域, 可用于 CMR 禁忌的患者^[25]。

2.2 心肌活力

将能通过血运重建恢复活力的心肌筛选出来, 是目前临床实践的重要挑战, 可用于指导缺血性心脏病患者的再血管化治疗。① SPECT 能根据心肌细胞摄取示踪剂的情况判断心肌活性。PET 技术通过检测心肌灌注与代谢水平的匹配程度, 可以预测心肌功能的恢复情况, 具有很高的敏感性, 且空间分辨率优于 SPECT 检查^[26]。通过心肌细胞对葡萄糖摄取情况的差异, ¹⁸F-脱氧葡萄糖 PET 可以区分慢性的心肌冬眠与心肌顿抑^[27]。② 常规心脏超声检查可以提供静息时心肌的收缩活动和厚薄程度等信息, 辅助判断心肌活性、评估梗死范围与透壁程度。STE 同样可以评价心肌活力^[28]。Gong 等^[29]采用 STE 与低剂量多巴酚丁胺负荷相结合的方法评估心肌的活性与收缩功能储备, 结果发现这种方法灵敏度、特异度与准确度优于 SPECT; 如果应用造影剂, 检查的准确度还能得到进一步提升^[30-31]。MCE 也可通过检测微循环障碍间接评估心肌残余活性^[32]。③ 多巴胺负荷的 CMR 可以直接判断心肌活力, CMR-LGE 方法检测的瘢痕透壁性也能间接反映心肌活力^[33]。当心肌处于冬眠或顿抑状态时, 心肌活力有可能通过血运重建再次恢复, 但这种可能性与 LGE 的透壁程度成反比。近期研究^[34]结果显示, 当 CMR-LGE 显示的瘢痕透壁范围 <50% 时, 患者心肌厚度和收缩力在再灌注治疗后能得到改善。CT 评估心肌活性的原理与 CMR 类似, 均是利用了造影剂在胞膜完整性丧失情况下的分布特点^[25]。

2.3 微循环障碍

微循环障碍 (microvascular obstruction, MVO) 与患者的不良预后密切相关。① MCE 可根据心肌细胞对造影剂微泡的摄取情况, 评价心肌梗死后心肌灌注^[35]。但是, 该方法会导致造影剂不良反应, 同时具有可重复性不佳、空间分辨率不高等局限性, 因此未在临床广泛使用。研究^[36]发现, STE 测量的梗死节段应变较低与 CMR 显示的微循环障碍独立相关。② CMR 是目前评估 MVO 的最为敏感和特异的方法^[37]。当 MVO 对心肌灌注产生严重影响时, CMR 会出现“充盈缺损”现象。一项 meta 分析^[38]提出了如下假设: 根据梗死后 1 年内 CMR 测量的梗死面积或 MVO 等信息, 可以更加准确地对 STEMI 患者进行风险分层。Symons 等^[39]近期的研究结果显示, 对于接受

了再灌注治疗的急性 ST 段抬高型心肌梗死患者, 短期内 CMR 显示的 MVO 是长期预后不良的强独立预测因子; 并且左心室 MVO 范围 $\geq 2.6\%$, 可以很好地独立预测患者全因死亡与需住院治疗的心力衰竭发生风险。③ 临床上还可应用有创的影像学检测方法进行 MVO 的评估。心肌灌注分级就是根据冠状动脉造影过程中造影剂是否能到达相应区域以及造影剂显影与消失速度, 对 MVO 进行定量评价^[40]; 但该方法评价标准模糊, 且重复性不佳。在此基础上, 笔者团队提出了心肌梗死溶栓治疗 (TIMI) 心肌灌注帧数计算方法, 将人为判断的造影剂显影时间这一标准替换为造影图像的帧数, 提高了微循环判断的准确度与敏感度^[41]。除此之外, 临床还可应用特殊的导丝计算冠状动脉血流储备分数、冠状动脉血流储备、冠状动脉微循环阻力指数等指标, 反映 MVO 的程度。

3 总结与展望

近年来, 各类影像学检查技术均取得了突飞猛进的发展。CMR 检查因其无与伦比的组织学成像优势, 更是开拓了其在诸多心血管病领域的应用。CMR 可以用来评估冠状动脉的狭窄程度。由于冠状动脉解剖结构细小以及运动情况难以预测等因素, 目前这种方法空间分辨率较差, 得到的图像质量与无法与 CT 相比。同时研究^[42]还发现, 提高 CMR 的场强大小能提高成像的信号噪声比和组织对比度, 高场强 CMR 甚至可以达到 0.01 mm 的成像分辨率。如将高场强 CMR 与冠状动脉显影相结合, 将大大提高血管的成像质量。虽然现阶段场强超过 3T 的 CMR 设备更多地用于科研机构, 但有望在不久后投入临床使用。此外, CMR 还可以在不使用造影剂的情况下, 通过动脉血管壁的厚度与硬度来评估动脉血管粥样硬化的程度, 适用于肾功能不全或造影剂无法耐受的患者^[43]。除了成像功能外, CMR 还能通过波谱检测了解心肌细胞的代谢活动, 更为直观地了解不同病理生理状态下心脏代谢的差异, 为寻找干预靶点提供依据。最新研究^[44]结果显示, 超高场强 (7T) CMR 与超极化 C13 相结合可以更好地检测心肌代谢。

心肌梗死后进行影像学评估的根本目的是通过不同影像学评估手段, 结合心脏结构、组织、功能、代谢方面的特点, 客观了解心肌损伤的程度, 对患者进行危险分层。风险评估模型可以帮助临床工作者识别高危患者, 制定合理的诊疗策略, 最大程度地挽救受损心肌, 从而更好地改善患者预后。

参·考·文·献

- [1] Liu H, Pozios I, Haileselassie B, et al. Role of global longitudinal strain in predicting outcomes in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Am J Cardiol*, 2017, 120(4): 670-675.
- [2] Schulz-Menger J, Bluemke DA, Bremerich J, et al. Standardized image interpretation and post processing in cardiovascular magnetic resonance: Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) board of trustees task force on standardized post processing[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15: 35.
- [3] Kinno M, Nagpal P, Horgan S, et al. Comparison of echocardiography, cardiac magnetic resonance, and computed tomographic imaging for the evaluation of left ventricular myocardial function: part 2 (diastolic and regional assessment)[J]. *Curr Cardiol Rep*, 2017, 19(1): 6.
- [4] Nagueh SF, Smiseth OA, Appleton CP, et al. Recommendations for the evaluation of left ventricular diastolic function by echocardiography: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2016, 17(12): 1321-1360.
- [5] Wdowiak-Okrojek K, Wejner-Mik P, Kasprzak JD, et al. Recovery of regional systolic and diastolic myocardial function after acute myocardial infarction evaluated by two-dimensional speckle tracking echocardiography[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2019, 39(2): 177-181.
- [6] Flachskampf FA, Biering-Sørensen T, Solomon SD, et al. Cardiac imaging to evaluate left ventricular diastolic function[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8(9): 1071-1093.
- [7] He B, Ge H, Yang F, et al. A novel method in the stratification of post-myocardial-infarction patients based on pathophysiology[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0130158.
- [8] Yang W, Zhang F, Tang H, et al. Summed thickening score by myocardial perfusion imaging: a risk factor of left ventricular remodeling in patients with myocardial infarction[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(3): 742-753.
- [9] Altiok E, Tiemann S, Becker M, et al. Myocardial deformation imaging by two-dimensional speckle-tracking echocardiography for prediction of global and segmental functional changes after acute myocardial infarction: a comparison with late gadolinium enhancement cardiac magnetic resonance[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2014, 27(3): 249-257.
- [10] Hsiao JF, Chung CM, Chu CM, et al. Two-dimensional speckle tracking echocardiography predict left ventricular remodeling after acute myocardial infarction in patients with preserved ejection fraction[J]. *PLoS One*, 2016, 11(12): e0168109.
- [11] Bhatt AS, Ambrosy AP, Velazquez EJ. Adverse remodeling and reverse remodeling after myocardial infarction[J]. *Curr Cardiol Rep*, 2017, 19(8): 71.
- [12] Ola RK, Meena CB, Ramakrishnan S, et al. Detection of left ventricular remodeling in acute ST elevation myocardial infarction after primary percutaneous coronary intervention by two dimensional and three dimensional echocardiography[J]. *J Cardiovasc Echogr*, 2018, 28(1): 39-44.
- [13] Jamiel A, Ebid M, Ahmed AM, et al. The role of myocardial viability in contemporary cardiac practice[J]. *Heart Fail Rev*, 2017, 22(4): 401-413.
- [14] Wai B, Thai WE, Brown H, et al. Novel phase-based noise reduction strategy for quantification of left ventricular function and mass assessment by cardiac CT: comparison with cardiac magnetic resonance[J]. *Eur J Radiol*, 2013, 82(8): e337-e341.
- [15] Zeb I, Li D, Nasir K, et al. Computerized left ventricular regional ejection fraction analysis for detection of ischemic coronary artery disease with multidetector CT angiography[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2013, 29(3): 685-692.
- [16] Kidawa M, Chiziński K, Zielińska M, et al. Real-time 3D echocardiography and tissue Doppler echocardiography in the assessment of right ventricle systolic function in patients with right ventricular myocardial infarction[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2013, 14(10): 1002-1009.
- [17] Lemarié J, Huttin O, Girerd N, et al. Usefulness of speckle-tracking imaging for right ventricular assessment after acute myocardial infarction: a magnetic resonance imaging/echocardiographic comparison within the relation between aldosterone and cardiac remodeling after myocardial infarction study[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2015, 28(7): 818-827.
- [18] Rallidis LS, Makavos G, Nihoyannopoulos P. Right ventricular involvement in coronary artery disease: role of echocardiography for diagnosis and prognosis[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2014, 27(3): 223-229.
- [19] Ramsey BC, Fentanes E, Choi AD, et al. Myocardial assessment with cardiac CT: ischemic heart disease and beyond[J]. *Curr Cardiovasc Imaging Rep*, 2018, 11(7): 16.
- [20] Pathan F, Marwick TH. Myocardial perfusion imaging using contrast echocardiography[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2015, 57(6): 632-643.
- [21] Grabka M, Wita K, Tabor Z, et al. Prediction of infarct size by speckle tracking echocardiography in patients with anterior myocardial infarction[J]. *Coron Artery Dis*, 2013, 24(2): 127-134.
- [22] Dweck MR, Williams MC, Moss AJ, et al. Computed tomography and cardiac magnetic resonance in ischemic heart disease[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 68(20): 2201-2216.
- [23] Bulluck H, Rosmini S, Abdel-Gadir A, et al. Impact of microvascular obstruction on semiautomated techniques for quantifying acute and chronic myocardial infarction by cardiovascular magnetic resonance[J]. *Open Heart*, 2016, 3(2): e000535.
- [24] Bulluck H, Hammond-Haley M, Weinmann S, et al. Myocardial infarct size by CMR in clinical cardioprotection studies: insights from randomized controlled trials[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(3): 230-240.
- [25] La Grutta L, Toia P, Maffei E, et al. Infarct characterization using CT[J]. *Cardiovasc Diagn Ther*, 2017, 7(2): 171-188.
- [26] Dilsizian V, Bacharach SL, Beanlands RS, et al. ASNC imaging guidelines/ SNMMI procedure standard for positron emission tomography (PET) nuclear cardiology procedures[J]. *J Nucl Cardiol*, 2016, 23(5): 1187-1226.
- [27] Köhler D, Arnold R, Loukanov T, et al. Right ventricular failure and pathobiology in patients with congenital heart disease: implications for long-term follow-up[J]. *Front Pediatr*, 2013, 1: 37.
- [28] Cai W, Dong Y, Tian L, et al. Predictive value of four-dimensional strain echocardiography for adverse cardiovascular outcomes in ST-elevation myocardial infarction patients treated with primary percutaneous coronary intervention[J]. *Cardiology*, 2018, 139(4): 255-264.
- [29] Gong L, Li D, Chen J, et al. Assessment of myocardial viability in patients with acute myocardial infarction by two-dimensional speckle tracking echocardiography combined with low-dose dobutamine stress echocardiography[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2013, 29(5): 1017-1028.
- [30] Hedgire SS, Osborne M, Verdini DJ, et al. Updates on stress imaging testing and myocardial viability with advanced imaging modalities[J]. *Curr Treat Options Cardiovasc Med*, 2017, 19(4): 26.
- [31] Karogiannis N, Senior R. Contrast echocardiography for detection of myocardial perfusion abnormalities[J]. *Herz*, 2017, 42(3): 287-294.
- [32] Seol SH, Lindner JR. A primer on the methods and applications for contrast echocardiography in clinical imaging[J]. *J Cardiovasc Ultrasound*, 2014, 22(3): 101-110.
- [33] Hedgire SS, Osborne M, Verdini DJ, et al. Updates on stress imaging testing and myocardial viability with advanced imaging modalities[J]. *Curr Treat Options Cardiovasc Med*, 2017, 19(4): 26.
- [34] Shah DJ, Kim HW, James O, et al. Prevalence of regional myocardial thinning and relationship with myocardial scarring in patients with coronary artery disease[J]. *JAMA*, 2013, 309(9): 909-918.
- [35] 盛欣成, 何奔. 冠状动脉微循环障碍检测方法进展[J]. *中国循环杂志*, 2017, 32(8): 816-819.
- [36] Bergerot C, Mewton N, Lacote-Roiron C, et al. Influence of microvascular obstruction on regional myocardial deformation in the acute phase of myocardial infarction: a speckle-tracking echocardiography study[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2014, 27(1): 93-100.
- [37] Pozo E, Sanz J. Imaging techniques in the evaluation of post-infarction function and scar[J]. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed)*, 2014, 67(9): 754-764.
- [38] Hamirani YS, Wong A, Kramer CM, et al. Effect of microvascular obstruction and intramyocardial hemorrhage by CMR on LV remodeling and outcomes after myocardial infarction: a systematic review and meta-analysis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(9): 940-952.
- [39] Symons R, Pontone G, Schwitter J, et al. Long-term incremental prognostic value of cardiovascular magnetic resonance after ST-segment elevation myocardial infarction: a study of the collaborative registry on CMR in STEMI[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(6): 813-825.
- [40] Niccoli G, Cosentino N, Spaziani C, et al. No-reflow: incidence and detection in the cath-lab[J]. *Curr Pharm Des*, 2013, 19(25): 4564-4575.
- [41] He B, Ding S, Qiao Z, et al. Influence of microvascular dysfunction on regional myocardial deformation post-acute myocardial infarction: insights from a novel angiographic index for assessing myocardial tissue-level reperfusion[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2016, 32(5): 711-719.
- [42] Marques JP, van der Zwaag W, Granziera C, et al. Cerebellar cortical layers: in vivo visualization with structural high-field-strength MR imaging[J]. *Radiology*, 2010, 254(3): 942-948.
- [43] van den Bosch HCM. Clinical advances in cardiovascular magnetic resonance imaging and angiography[D]. Leiden: Leiden University, 2018.
- [44] Manning WJ, Pennell DJ. Cardiovascular magnetic resonance: a companion to Braunwald's heart disease[M]. Oxford: Elsevier Health Sciences, 2018.

