

- (14):1297-1309.
- [15] Roe MT, Goodman SG, Ohman EM, et al. Elderly patients with acute coronary syndromes managed without revascularization: insights into the safety of long-term dual antiplatelet therapy with reduced-dose prasugrel versus standard-dose clopidogrel[J]. *Circulation*, 2013, 128(8):823-833.
- [16] Yusuf S, Zhao F, Mehta SR, et al. Effects of clopidogrel in addition to aspirin in patients with acute coronary syndromes without ST-segment elevation[J]. *N Engl J Med*, 2001, 345(7):494-502.
- [17] Bach RG, Cannon CP, Weintraub WS, et al. The effect of routine, early invasive management on outcome for elderly patients with non-ST-segment elevation acute coronary syndromes[J]. *Ann Intern Med*, 2004, 141(3):186-195.
- [18] Wallentin LC. Aspirin (75 mg/d) after an episode of unstable coronary artery disease: long-term effects on the risk for myocardial infarction, occurrence of severe angina and the need for revascularization[J]. *J Am Coll Cardiol*, 1991, 18(7):1587-1593.
- [19] Alfonso F. Comments on the 2017 ESC guidelines for the management of acute myocardial infarction in patients presenting with ST-segment elevation[J]. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed)*, 2017, 70(12):1039-1045.
- [20] Vicent L, Velásquez-Rodríguez J, Valero-Masa MJ, et al. Predictors of high Killip class after ST segment elevation myocardial infarction in the era of primary reperfusion[J]. *Int J Cardiol*, 2017, 248:46-50.
- [21] Choudhury T, West NE, El-Omar M. ST elevation myocardial infarction[J]. *Clin Med*, 2016, 16(3):277-282.
- [22] Shanmugam VB, Harper R, Meredith I, et al. An overview of PCI in the very elderly[J]. *J Geriatr Cardiol*, 2015, 12(2):174-184.
- [23] Serbin MA, Guzauskas GF, Veenstra DL. Clopidogrel-proton pump inhibitor drug-drug interaction and risk of adverse clinical outcomes among PCI-treated ACS patients: a meta-analysis[J]. *J Manag Care Spec Pharm*, 2016, 22(8):939-947.
- [24] Task Force on the management of ST-segment elevation acute myocardial infarction of the European Society of Cardiology (ESC), Steg PG, James SK, et al. ESC Guidelines for the management of acute myocardial infarction in patients presenting with ST-segment elevation[J]. *Eur Heart J*, 2012, 33(20):2569-2619.
- [25] Sui YG, Teng SY, Qian J, et al. A retrospective study of an invasive versus conservative strategy in patients aged ≥ 80 years with acute ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *J Int Med Res*, 2019, 47(9):4431-4441.
- [26] Salinas GLA, Fernández MS, Izco MP, et al. Frailty predicts major bleeding within 30 days in elderly patients with acute coronary syndrome[J]. *Int J Cardiol*, 2016, 222:590-593.
- [27] Little M, Johnstone C. Guidelines for the management of acute coronary syndromes 2006[J]. *Med J Aust*, 2007, 184(6):372.
- [28] Jolly SS, Shenkman H, Brieger D, et al. Quantitative troponin and death, cardiogenic shock, cardiac arrest and new heart failure in patients with non-ST-segment elevation acute coronary syndromes (NSTEMI ACS): insights from the Global Registry of Acute Coronary Events[J]. *Heart*, 2011, 97(3):197-202.
- [29] Sui YG, Teng ST, Qian J, et al. Invasive versus conservative strategy in consecutive patients aged 80 years or older with non-ST-elevation myocardial infarction: a retrospective study in China[J]. *J Geriatr Cardiol*, 2019, 16(10):741-748.
- [30] Sinclair H, Kunadian V. Coronary revascularisation in older patients with non-ST elevation acute coronary syndromes[J]. *Heart*, 2016, 102(6):416-424.

收稿日期:2019-10-30

心脏磁共振技术在冠状动脉微血管疾病中的运用进展

关星绘 孙林

(昆明医科大学第二附属医院心内科, 云南 昆明 650101)

【摘要】近年来随着人们对冠状动脉疾病的深入研究,冠状动脉微血管疾病的临床意义日益受到人们的重视,许多现有的证据表明冠状动脉微血管疾病是心脏疾病的病因之一,在冠状动脉疾病的发展中起着重要的作用。心脏磁共振技术具有多序列、多层次、高分辨率的特点,可以一站式地评价心脏的结构、运动及心肌的活性,被广泛运用于心血管疾病的诊疗过程中。现就心脏磁共振技术在冠状动脉微血管疾病中的运用进行综述。

【关键词】心脏磁共振技术;冠状动脉微血管疾病;心肌灌注;预后

【DOI】10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2020.04.004

Application of Cardiac Magnetic Resonance in Coronary Microvascular Disease

GUAN Xinghui, SUN Lin

(Department of Cardiology, The Second Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming 650101, Yunnan, China)

基金项目:国家自然科学基金(8760087);2018年昆明医科大学重大科技成果培育项目(CGPY201804)

通讯作者:孙林, E-mail: sunlinkm@sina.com

【Abstract】 In recent years, with the research progress in coronary artery disease, the clinical significance of coronary microvascular disease has attracted increasing attention. According to many evidences, coronary microcirculation disease is one of the main causes of heart disease, which plays an important role in the course of coronary artery disease. Cardiac magnetic resonance (CMR) technology has the characteristics of multi-sequence, multi-layer and high resolution, which can be a one-stop evaluation of cardiac structure, motion and myocardial activity, and is widely used in the diagnosis and treatment of cardiovascular diseases. This article reviews the application progress of CMR in coronary microvascular disease.

【Key words】 Cardiac magnetic resonance technology; Coronary microvascular diseases; Myocardial perfusion; Prognosis

近年来随着人们对冠状动脉疾病的深入研究,冠状动脉微血管疾病 (coronary microvascular disease, CMVD) 的临床意义日益受人们的关注。有临床实践显示在具有典型心绞痛且实验室检查具有动态演变,但冠状动脉造影检查为非阻塞性病变的患者中,45%~60% 的患者为冠状动脉微血管病^[1],同时也有研究表明 CMVD 是导致心血管不良事件的独立危险因素^[2-3]。因此,CMVD 的检出对疾病的治疗具有十分重要的临床意义。目前 CMVD 较常用的检查方法主要有非侵入性的经胸彩色多普勒超声心动图、心肌超声造影、单光子发射计算机断层成像术 (single-photon emission computed tomography, SPECT)、心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR) 以及侵入性的冠状动脉内多普勒检查,在众多检查中 CMR 凭借其无创、高分辨率和无离子辐射,可以“一站式”获取心脏结构、功能和心肌活性等特点^[4],被广泛运用于临床实践中,已逐渐成为无创评价心肌病变的金标准,被认为是无创诊断和评价心肌梗死及微循环障碍的基本方法。现就 CMR 技术在 CMVD 中的运用进行综述。

1 CMVD 的定义及发病机制

冠状动脉微循环是由直径 $<300\ \mu\text{m}$ 、供应心肌灌注的所有血管和起源于较大的心外膜传导血管组成的心肌供血和代谢的主要场所,包括前微动脉(直径 $<300\ \mu\text{m}$)、微动脉(直径 $<200\ \mu\text{m}$)、毛细血管和微静脉^[5-6]。2013 年欧洲心脏病学会稳定性冠状动脉疾病的治疗指南中正式提出了 CMVD 的概念^[7]。中国专家共识将 CMVD 定义为:在多种致病因素的作用下,冠状动脉微循环的结构和/或功能异常所致的劳力性心绞痛或心肌缺血客观证据的临床综合征^[1]。因此,任何因素导致冠状动脉微血管功能障碍和/或结构异常均会导致 CMVD 的发生。

目前 CMVD 的发病机制尚不清楚,但研究表明冠状动脉微循环是一个动态平衡的系统,受多种生理机制的调节,这些机制在不同的血管区域、不同的临床情况下有所不同^[8]。

2 CMR 在心脏疾病中的运用概况

CMR 通过设定不同的扫描参数、对比剂的使用可以获得一组多方位、多层面、多维度的图像,通过一定的后处理软件可以系统地评估心脏的结构、功能、心

肌的灌注以及心肌活性等。目前临床上使用较多的是以下几种成像技术:(1)稳态自由进动电影成像:该技术目前已逐渐成为评估心功能的金标准,具有很强的重复性,可以较为准确地提供心脏的射血分数、心室容积等心功能的参数,同时可以直观地反映心肌重塑的程度;(2)灌注成像:该技术通过血液携带对比剂进入心肌灌注区,根据心肌被灌注时信号的强弱来反映心肌灌注区的血供情况。同时使用一定的药物负荷试验评价血管的舒缩功能;(3)延迟强化技术:该技术可以准确地评估心肌病变,定量评估心肌的瘢痕情况;(4)组织学 T1 mapping 成像、T2 mapping 成像及弥散加权成像:是近几年出现的、逐渐趋于成熟的新技术,可以量化心肌组织的信息,与组织学的研究具有良好的一致性^[9-10]。

3 CMR 在 CMVD 的运用价值

3.1 灌注成像在 CMVD 中的运用价值

3.1.1 首过灌注成像技术

CMR 首过灌注成像是通过静脉注射的对比剂随血流迅速分布到心肌组织,使心肌信号增强并产生图像对比,通过后处理软件系统获得心肌各个节段的灌注曲线,从而评估心肌灌注的程度。CMR 上信号的强弱主要取决于心肌组织内的血流灌注量,而心肌的血流灌注量又决定于心肌的微循环状态。当微循环损害时,造影剂随血流进入心肌组织的时间延长,在 CMR 的首过灌注成像中就会表现为灌注减低或灌注缺损(低信号),而正常的心肌组织则表现为相对的高信号。Jimenez 等^[10]发现首过灌注成像技术对心肌梗死区域内微血管的损伤具有较高的敏感性,可以用来评价心室内心肌微血管床的容积大小。Jerosch-Herold 等^[11]的研究证实,在心肌梗死患者中首过灌注成像技术有助于发现仍有活性的顿抑心肌,从而可以更好地优化冠状动脉的血运重建治疗。目前首过灌注成像技术是评价心肌组织微循环功能及心肌活性的主要方法。

3.1.2 负荷灌注成像技术

负荷灌注成像技术是先使用血管扩张药物诱导心肌血管扩张,随后静脉注射对比剂观察对比剂进入心肌各节段的信号强弱,通过后处理软件系统获得心肌各个节段的灌注曲线。当运用血管扩张剂后,正常供血区域的冠状动脉血流量增加,同时远端的血管阻力减小,而异常的冠状动脉仅轻度扩张甚至不能扩张,这使得微循

环损害的供血区域与正常供血区域的灌注差异更明显,灌注减低或灌注缺损的表现更突出。目前腺苷是临床上最常用于 CMR 心肌灌注成像的血管舒张剂,许多国内外的研究表明腺苷负荷状态下的 CMR 心肌灌注成像,对冠心病患者具有较好的诊断价值。Pilz 等^[12]的研究发现一例 26 岁男性心肌梗死患者首过灌注成像提示病变节段灌注减低,行腺苷负荷灌注成像后病变节段表现为灌注缺损,在随后的治疗中对该患者进行了冠状动脉血运重建治疗,随访至本研究完成时该患者均未发生主要不良心血管事件。Buckert 等^[13]通过对 1 229 例患者的前瞻性研究发现:腺苷负荷 CMR 灌注成像中存在可逆性灌注缺损的患者,其发生主要不良心血管事件的概率增加 3 倍。

3.2 延迟灌注成像技术在 CMVD 中的运用价值

钆造影剂延迟成像技术 (late gadolinium enhancement, LGE) 是在静脉注射对比剂二亚乙基三胺五乙酸钆 (gadolinium diethylenetriamine pentaacetic acid, Gd-DTPA) 后 10 ~ 20 min 扫描获取图像。Gd-DTPA 是一种大分子物质可以通过血管壁,但不能通过完好无损的细胞膜。当心肌细胞急性损伤时,心肌细胞膜破裂,对比剂通过受损的细胞膜进入细胞内,加之细胞间质水肿,细胞外间质增大,使得进入病变节段的对比剂较正常组织排空延迟,在延迟强化图像上表现为高信号^[14]。目前临床上常根据不同延迟强化形式来区别不同的心脏疾病。

由于微循环的结构和/或功能损伤导致相应节段的心肌缺血,常表现为心肌点片状的缺血, Wagner 等^[15]的动物模型组织切片研究发现延迟显像可准确地检测出心肌梗死的范围及形状,甚至可检测到 <1 g 的心肌梗死。目前有研究表明缺血可造成心内膜下易损性^[16], von Knobelsdorff-Brenkenhof 等^[17]通过对比心脏的几种无创检查发现,CMR 的延迟强化技术对于心内膜下梗死的敏感度高于 SPECT。

在临床实践中,有部分急性心肌梗死患者再灌注治疗后出现了冠状动脉“无复流”现象,经大量的研究证实这种“无复流”现象与冠状动脉微血管阻塞相关,是心肌梗死患者再灌注治疗失败的重要原因,也是心肌梗死患者发生主要不良心血管事件的独立危险因素。当急性心肌梗死伴有微血管阻塞时,在心脏磁共振延迟成像中表现为高信号的梗死区域内的低信号区^[17-18]。与首过灌注成像相比, LGE 评估微血管阻塞时具有最小变异^[19]。

3.3 T1 mapping 技术在 CMVD 中的运用价值

T1 mapping 是近年来快速发展的 CMR 技术,通过检测心肌血容量和心肌含水量提高缺血心肌的检测,参数图像中包含的每一个像素决定所得到的 T1 弛豫时间。各组织类型均具有特定范围的 T1 正常值,偏离正常值常预示着疾病的发生^[20]。Liu 等^[21]的研究

发现根据初始值 T1 可鉴别心肌损伤区是否可逆:可逆的心肌损伤区初始值 T1 为 (955 ± 17) ms,不可逆心肌损伤区初始值 T1 为 $(1\,442 \pm 84)$ ms。Ugander 等^[22]通过建立犬心肌梗死模型发现根据不同的 T1 值,可以区分不可逆的心肌损伤区和可逆的心肌损伤区,且结果与组织学病理学氯化三苯基四氮唑染色结果具有高度的一致性。Langhans 等^[23]通过 T1 mapping 在 1.5 T 下测出的可逆损伤区和 SPECT 技术得到的可逆损伤区高度匹配。

3.4 T2 mapping 技术在 CMVD 中的运用价值

T2 mapping 技术是近年来出现的 CMR 新技术,以 T2 平衡稳态自由进动序列为成像基础,获得相应心肌的 T2 横向弛豫时间。心肌缺血损伤,如急性心肌梗死、再灌注损伤,引起心肌水肿时心肌 T2 的值会发生改变,通过定量测定相应节段的 T2 值,可以较为准确地了解心肌水肿的严重程度,从而预测患者的预后。Wassmuth 等^[24]研究发现 T2 mapping 技术能有效地从正常心肌中鉴别出水肿心肌。

目前国内外研究发现在急性 ST 段抬高型心肌梗死中梗死区的微血管损伤主要表现为微血管阻塞和红细胞外渗,即心肌内出血 (intramyocardial hemorrhage, IMH),二者均可通过 CMR 检查明确诊断^[25]。外国学者通过动物实验发现发生微血管梗阻者不一定有 IMH,但发生 IMH 者一定有微血管梗阻。这可能与随着微血管阻塞时间的延长,微血管的功能及完整性进一步破坏导致红细胞外渗相关,加之再灌注损伤促进了 IMH 的发生。单纯的微血管梗阻者在 T2 加权序列表现为低信号区,而 IMH 区则表现为中心暗区,这与血红蛋白分解产物的顺磁效应有关。此外, Verhaert 等^[26]研究发现心肌梗死区域有微循环损伤的梗死核心区域 T2 值低于无微循环损伤区域。Naßenstein 等^[27]发现 T2 mapping 技术与心脏电影及 LGE 相比, T2 mapping 的结果一致性和准确度更高。Abdel-Aty 等^[28]发现 T2 高信号可以在肌钙蛋白开始升高和 LGE 出现高信号前探测到心肌的缺血性损伤,对临床早期治疗和干预心肌损伤有重要的指导意义。

3.5 多 b 值弥散加权成像技术在冠状动脉微血管疾病中的运用价值

多 b 值弥散加权成像技术是根据体素内不相干运动 (intravoxel incoherent motion, IVIM) 理论设计的成像技术,根据水分子的扩散信息不仅能获取组织内单纯水分子的弥散信息 D,即弥散系数,同时还能获得反映灌注相关弥散参数 D^* ,即假性弥散系数,以及感兴趣区内微循环所占比例的灌注分数 f,后者可以反映组织的灌注信息^[29]。该技术目前已经广泛用于神经系统、骨骼肌系统、腹部诸脏器、乳腺及肌肉组织的检查中,并能反映不同病变的微循环差异。将弥散加权成像技术运用于心脏检查时,由于受呼吸运动及心

脏搏动的影响,造成心肌信号的丢失,b 值越大,心肌信号丢失越显著。因此,在心脏的扫描中通常使用多个低 b 值的弥散加权进行扫描,并根据参数的差异反应心肌组织的灌注情况。Vignaud 等^[30]在动物实验中发现 IVIM 技术不仅能获取心肌微循环的灌注情况,还可以获得毛细血管的分布与大致走向信息。An 等^[31]运用 IVIM 技术观察到,急性心肌梗死患者行经皮冠状动脉介入治疗术后心肌的水肿和心肌的灌注是一个动态的过程。由于该技术要求较高、需要患者的高度配合、多个参数的设定及目前尚无金标准来证实其获得心肌损伤信息的准确性,因此目前该技术尚未常规应用于临床。

4 小结

综上所述,CMR 技术在 CMVD 的临床诊疗中具有重要的临床运用价值。多序列相结合可以较为准确地获取心肌灌注、心肌活性等微循环相关信息,为心脏疾病的诊治、预后的评估以及危险程度分层提供了重要的临床依据。随着磁共振技术的发展,CMR 技术的不断改进、新技术的出现定能为我们提供更多、更准确的冠状动脉微循环信息。

参考文献

- [1] 中华医学会心血管病学分会基础研究学组,中华医学会心血管病学分会介入心脏病学组,中华医学会心血管病学分会女性心脏健康学组,等. 冠状动脉微血管疾病诊断和治疗的专家共识[J]. 中国循环杂志,2017,32(5):421-430.
- [2] Jespersen L, Hvelplund A, Abildstrøm SZ, et al. Stable angina pectoris with no obstructive coronary artery disease is associated with increased risks of major adverse cardiovascular events[J]. *Eur Heart J*, 2012, 33(6):734-744.
- [3] Murthy VL, Naya M, Taqueti VR, et al. Effects of sex on coronary microvascular dysfunction and cardiac outcomes[J]. *Circulation*, 2014, 129(24):2518-2527.
- [4] 吴执茗, 李晨, 徐立彦. 冠状动脉微血管功能障碍的诊断方法研究进展[J]. 心血管病学进展, 2019, 40(1):41-45.
- [5] Komaru T, Kanatsuka H, Shirato K. Coronary microcirculation: physiology and pharmacology[J]. *Pharmacol Ther*, 2000, 86(3):217-261.
- [6] Eriksson S, Nilsson J, Stureson C. Non-invasive imaging of microcirculation: a technology review[J]. *Med Devices (Auckl)*, 2014, 7:445-452.
- [7] Committee SG. Comments on the 2013 ESC guidelines on the management of stable coronary artery disease[J]. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed)*, 2014, 67(2):80-86.
- [8] Crea F, Camici PG, Bairey Merz CN. Coronary microvascular dysfunction: an update[J]. *Eur Heart J*, 2014, 35(17):1101-1111.
- [9] Robbers LF, Eerenberg ES, Teunissen PF, et al. Magnetic resonance imaging-defined areas of microvascular obstruction after acute myocardial infarction represent microvascular destruction and haemorrhage[J]. *Eur Heart J*, 2013, 34(30):2346-2353.
- [10] Jimenez JL, Crean AM, Wintersperger BJ. Late gadolinium enhancement imaging in assessment of myocardial viability: techniques and clinical applications[J]. *Radiol Clin North Am*, 2015, 53(2):397-411.
- [11] Jerosch-Herold M, Seethamraju RT, Swingen CM, et al. Analysis of myocardial perfusion MRI[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2004, 19(6):758-770.
- [12] Pilz G, Jeske A, Klos M, et al. Prognostic value of normal adenosine-stress cardiac magnetic resonance imaging[J]. *Am J Cardiol*, 2008, 101(10):1408-1412.
- [13] Buckert D, Dewes P, Walcher T, et al. Intermediate-term prognostic value of reversible perfusion deficit diagnosed by adenosine CMR: a prospective follow-up study in a consecutive patient population[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(1):56-63.
- [14] 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.
- [15] Wagner A, Mahrholdt H, Holly TA, et al. Contrast-enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography (SPECT) perfusion imaging for detection of subendocardial myocardial infarcts: an imaging study[J]. *Lancet*, 2003, 361(9355):374-379.
- [16] van de Hoef TP, Nolte F, Rolandi MC, et al. Coronary pressure-flow relations as basis for the understanding of coronary physiology[J]. *J Mol Cell Cardiol*, 2012, 52(4):786-793.
- [17] von Knobelsdorff-Brenkenhoff F, Schulz-Menger J. Cardiovascular magnetic resonance imaging in ischemic heart disease[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2012, 36(1):20-38.
- [18] Wu KC. CMR of microvascular obstruction and hemorrhage in myocardial infarction[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2012, 14(1):68.
- [19] Kidambi A, Mather AN, Motwani M, et al. The effect of microvascular obstruction and intramyocardial hemorrhage on contractile recovery in reperfused myocardial infarction: insights from cardiovascular magnetic resonance[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15(1):58-76.
- [20] Mather AN, Lockie T, Nagel E, et al. Appearance of microvascular obstruction on high resolution first-pass perfusion, early and late gadolinium enhancement CMR in patients with acute myocardial infarction[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2009, 11(1):33-43.
- [21] Liu A, Wijesurendra RS, Francis JM, et al. Adenosine stress and rest T1 mapping can differentiate between ischemic, infarcted, remote, and normal myocardium without the need for gadolinium contrast agents[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(1):27-36.
- [22] Ugander M, Bagi PS, Oki AJ, et al. Myocardial edema as detected by pre-contrast T1 and T2 CMR delineates area at risk associated with acute myocardial infarction[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2012, 5(6):596-603.
- [23] Langhans B, Nadjiri J, Jähnichen C, et al. Reproducibility of area at risk assessment in acute myocardial infarction by T1- and T2-mapping sequences in cardiac magnetic resonance imaging in comparison to Tc99m-Sestamibi SPECT[J]. *J Cardiovasc Imaging*, 2014, 30(7):1357-1363.
- [24] Wassmuth R, Prothmann M, Utz W, et al. Variability and homogeneity of cardiovascular magnetic resonance myocardial T2-mapping in volunteers compared to patients with edema[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15(1):27.
- [25] Fröhlich GM, Meier P, White SK, et al. Myocardial reperfusion injury: looking beyond primary PCI[J]. *Eur Heart J*, 2013, 34(23):1714-1722.
- [26] Verhaert D, Thavendiranathan P, Giri S, et al. Direct T2 quantification of myocardial edema in acute ischemic injury[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2011, 4(3):269-278.
- [27] 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[J]. *Rofo*, 2014, 186(2):166-172.
- [28] Abdel-Aty H, Cocker M, Meek C, et al. Edema as a very early marker for acute myocardial ischemia: a cardiovascular magnetic resonance study[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 53(14):1194-1201.
- [29] le Bihan D, Breton E, Lallemand D, et al. MR imaging of intravoxel incoherent motions: application to diffusion and perfusion in neurologic disorders[J]. *Radiology*, 1986, 161(2):401-407.
- [30] Vignaud A, Rodriguez I, Ennis DB, et al. Detection of myocardial capillary orientation with intravascular iron-oxide nanoparticles in spin-echo MRI[J]. *Magn Reson Med*, 2006, 55(4):725-730.
- [31] An DA, Chen BH, Rui-Wu, et al. Diagnostic performance of intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging in the assessment of the dynamic status of myocardial perfusion[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2018, 48(6):1602-1609.

收稿日期:2019-10-28