

5. 0T MR for cardiac imaging: Comparison with 3. 0T MR

LAN Lan¹, YE Naili¹, HU Huijuan¹, SUN Wenbo¹, SUN Rongqing¹, LING Gonghao¹,
DU Tingyi¹, LI Xuan¹, SONG Xiaopeng², XU Haibo^{1*}

(1. Department of Radiology, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China;

2. Central Research Institute, United Imaging Group, Wuhan 430200, China)

[Abstract] **Objective** To observe the feasibility of 5. 0T MR for cardiac imaging. **Methods** Three patients with heart diseases and 17 healthy volunteers were prospectively enrolled. Cardiac MR (CMR) cine sequence and black blood sequence imaging were performed using 5. 0T and 3. 0T MR scanner, respectively. The image quality and artifacts degrees were compared between 5. 0T and 3. 0T CMR images, and the consistency of left ventricular parameters obtained using 5. 0T and 3. 0T scanners was analyzed. **Results** No significant difference of image quality nor artifacts degrees was found between 5. 0T and 3. 0T CMR images (all $P > 0. 05$). The left ventricular end diastolic volume (EDV), end systolic volume (ESV), ejection fraction (EF), stroke volume (SV) and end diastolic mass (EDM) derived from cine images acquired at different fields were in a good agreement (all $ICC > 0. 75$, all $P < 0. 001$). **Conclusion** 5. 0T MR could be used for cardiac imaging, with image quality of cine and black blood sequences comparable to that of 3. 0T MR.

[Keywords] heart; magnetic resonance imaging; prospective studies

DOI:10. 13929/j. issn. 1003-3289. 2024. 05. 006

5. 0T MR 心脏成像:与 3. 0T MR 对比

兰 兰¹, 叶乃力¹, 胡慧娟¹, 孙文博¹, 孙荣庆¹, 凌公豪¹, 杜庭屹¹,
李 轩¹, 宋潇鹏², 徐海波^{1*}

(1. 武汉大学中南医院医学影像科, 湖北 武汉 430071; 2. 联影集团中央研究院, 湖北 武汉 430200)

[摘要] **目的** 观察 5. 0T MR 用于心脏成像的可行性。 **方法** 前瞻性对 3 例心脏疾病患者和 17 名健康志愿者行 5. 0T 及 3. 0T 心脏 MR(CMR)电影序列和黑血序列成像;比较 5. 0T 与 3. 0T CMR 图像质量和伪影程度分级,并分析以其所获左心室参数的一致性。 **结果** 5. 0T 与 3. 0T CMR 图像质量和伪影程度分级差异均无统计学意义(P 均 $> 0. 05$),基于不同场强电影图像获得的左心室舒张末期容积(EDV)、收缩末期容积(ESV)、射血分数(EF)、每搏输出量(SV)及舒张末期心肌质量(EDM)的一致性均好(ICC 均 $> 0. 75$, P 均 $< 0. 001$)。 **结论** 5. 0T MR 可用于心脏成像,其电影序列及黑血序列图像质量与 3. 0T MR 相当。

[关键词] 心脏; 磁共振成像; 前瞻性研究

[中图分类号] R542. 2; R445. 2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2024)05-0661-05

心脏 MR(cardiac MR, CMR)是评估心肌疾病的重要成像方法^[1-2]。超高场强(ultra-high field, UHF)MRI 可克服传统 1. 5T 和 3. 0T MRI 信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)不足的限制性,有望为观察心肌

微结构、冠状动脉管壁结构及斑块成分等提供更多信息;但 7. 0T MRI 往往存在 B1 场不均匀、磁流体动力学效应及高比吸收率(specific absorption rate, SAR)等问题^[3-9],限制了其在心血管领域的应用和发展^[10]。

[基金项目] 湖北省科技创新专项(2021ACA013)。

[第一作者] 兰兰(1989—),女(侗族),湖北恩施人,博士,副主任医师。研究方向:心血管影像。E-mail: lanlanjulia@whu. edu. cn

[通信作者] 徐海波,武汉大学中南医院医学影像科,430071。E-mail: xuhaibo@whu. edu. cn

[收稿日期] 2024-01-01 **[修回日期]** 2024-05-10

目前 5.0T MR 已获批用于临床 CMR 成像,其 SNR 和分辨率较 3.0T MRI 更高,且所面临的技术挑战远不及 7.0T MRI。本研究通过与 3.0T MR 对比,观察 5.0T MR 用于心脏成像的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 前瞻性纳入 2021 年 11 月—12 月武汉大学中南医院 3 例心脏疾病患者,包括 1 例 28 岁男性瓣膜病、1 例 30 岁男性肥厚型心肌病及 1 例 30 岁女性扩张型心肌病患者;同期招募 17 名健康成人志愿者。上述 20 人中,男 13 人、女 7 人,年龄 20~32 岁、平均(27.3±3.5)岁,体质指数(body mass index, BMI) 18.38~28.65 kg/m²、平均(23.06±3.16)kg/m²(其中 5 名 BMI≥25 kg/m²)。排除标准:①心律失常;②幽闭恐惧症;③体内存在金属植入物或异物;④孕妇;⑤文身。本研究经院伦理委员会批准(2021110);受试者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 采用联影 uMR Jupiter 5.0T MR 仪(配备 24 通道体部接收线圈、32 通道脊柱接收线圈及 8 通道发射线圈,发射线圈为环形结构,每个回路包含 12 个电容,口径 60 cm,5.0T CMR 扫描;采用新型统计初值的射频匀场算法),以及 uMR 790 3.0T MR 仪(配备 12 通道体部线圈、12 通道脊部线圈及单通道发射线圈),5.0T 与 3.0T CMR 扫描时间间隔不超过 2 天,且均由同名技师完成扫描。嘱受试者仰卧、呼气后屏气,采用心电门控技术,行全心短轴和 3 个标准长轴层面电影序列成像、单层左心室中间段短轴层面快速自旋回波(fast spin echo, FSE)黑血序列成像。电影序列参数:5.0T MR 快速梯度回波(fast gradient echo, FGRE)序列,TR 4.50 ms,TE 2.45 ms,带宽 500 Hz,FA 10°,FOV 360 mm×320 mm,层厚 6 mm,层间距 1.5 mm,体素大小 1.6 mm×1.6 mm×6.0 mm,并行采集加速因子 2,单层重建 25 帧图像,单层成像时间 11 s;3.0T MR 平衡稳态自由进动(balanced steady state free precession, bSSFP)序列,TR 3.05 ms,TE 1.41 ms,带宽 1 000 Hz,FA 51°,FOV 360 mm×320 mm,层厚 6 mm,层间距 1.5 mm,体素大小 1.6 mm×1.6 mm×6.0 mm,并行采集加速因子 2,单层重建 25 帧图像,单层成像时间 7 s。黑血序列参数:T1WI,TE 31.1 ms,ETL 8,带宽 500 Hz,FOV 380 mm×320 mm,层厚 6.0 mm,体素大小 1.4 mm×1.4 mm×6.0 mm;T2WI,TE 88.14 ms,ETL 15,带宽 300 Hz,FOV 380 mm×320 mm,层厚 6 mm,体素大小 1.4 mm×1.4 mm×6 mm。

对上述 3 例患者及 1 名健康志愿者额外行 5.0T MR 高分辨率(1.0 mm×1.0 mm×2.0 mm)扫描,采集四腔心和单层左心室中间段短轴层面。

1.3 图像评估 由 2 名放射科医师根据信号均匀性、对比度(血液、心肌及周围组织)及清晰度(心脏结构)评价 CMR 图像质量:1 分,信号均匀性及对比度差,可见明显伪影,显示心脏结构不清,无法用于诊断;2 分,信号均匀性及对比度略差,可见伪影,心脏结构尚可分辨但影响诊断;3 分,信号均匀性及对比度尚可,可见轻度伪影,心脏结构显示清晰,基本不影响诊断;4 分,信号均匀性及对比度较好,未见明显伪影,心脏结构显示清晰,可用于诊断;5 分,图像信号均匀且对比度高,未见伪影,显示心脏结构清晰,满足诊断需要。同时对 MRI 伪影程度进行分级:1 级,伪影重,无法用于诊断;2 级,伪影明显,严重影响诊断;3 级,中等程度伪影,影响诊断;4 级,轻度伪影,略影响诊断;5 级,轻微或无伪影,可用于诊断。取 2 名医师的平均值为最终结果。

1.4 图像后处理 采用后处理软件 CVI42(circle cardiovascular imaging)5.12.4 版于全心短轴电影中自动识别并勾画舒张末期和收缩末期左心室内、外膜轮廓,由医师核对并手动校正;软件自动计算左心室舒张末期容积(end diastolic volume, EDV)、收缩末期容积(end systolic volume, ESV)、射血分数(ejection fraction, EF)、每搏输出量(stroke volume, SV)及舒张末期心肌质量(end diastolic mass, EDM)。

1.5 统计学分析 采用 SPSS 26.0 统计分析软件。以中位数(上下四分位数)表示不符合正态分布的计量资料,组间行配对样本 Wilcoxon 检验。采用 Bland-Altman 分析、组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)评估观察者间一致性;以 ICC<0.30 为一致性差,0.30≤ICC<0.50 为一致性一般,0.50≤ICC<0.75 为一致性较好,0.75≤ICC 为一致性好。行 Spearman 或 Pearson 相关性分析。P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 图像质量与伪影程度分级 2 名医师评估图像质量和伪影程度分级的一致性均较好或好(ICC=0.596~0.840, P 均<0.05)。在 20 例受试者的 CMR 图像中,1 例的 5.0T MR T2WI 和 2 例的 5.0T FGRE 电影图像可见 B1 场不均匀造成的轻度伪影,主要表现为短轴层面右心室下壁局部信号减低。5.0T 与 3.0T CMR 总体图像质量和伪影程度分级差异均无统计学意义(P 均>0.05)。见表 1、图 1。

表 1 5.0T 与 3.0T CMR 图像质量及伪影程度分级比较

MR 设备	图像质量评分			伪影程度分级		
	T1WI	T2WI	电影序列	T1WI	T2WI	电影序列
5.0T	5(4,5)	5(4,5)	5(4,5)	5(4,5)	5(4,5)	5(4,5)
3.0T	5(5,5)	5(5,5)	5(5,5)	5(5,5)	5(5,5)	5(5,5)
Z 值	-1.633	-1.941	-1.633	-1.000	-1.265	-1.134
P 值	0.102	0.052	0.102	0.317	0.206	0.257

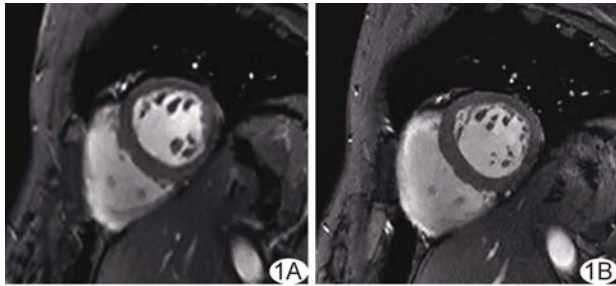


图 1 健康志愿者,女,26 岁,左心室中段短轴电影图像 A. 3.0T MR 采集的电影图像; B. 5.0T MR 采集的电影图像

2.2 5.0T 与 3.0T MR 所测左心室功能和心肌质量参数的一致性 基于 5.0T 与 3.0T MR 获得的左心室参数(EDV、ESV、EF、SV、EDM)的一致性良好(ICC 均 > 0.75, P 均 < 0.001)且呈线性相关。见表 2 和图 2、3。

表 2 以 5.0T 与 3.0T MR 所测左心室功能和心肌质量参数的一致性分析

左心室参数	ICC	95% CI	P 值
EDV	0.983	0.957, 0.993	< 0.001
ESV	0.976	0.942, 0.991	< 0.001
EF	0.931	0.815, 0.973	< 0.001
SV	0.966	0.887, 0.988	< 0.001
EDM	0.958	0.180, 0.991	< 0.001

2.3 5.0T 高分辨率 MR 成像 5.0T 高分辨率(1.0 mm × 1.0 mm × 2.0 mm)MRI 可显示包括肌小梁、乳头肌、腱索和右心室结构在内的精细解剖结构。见图 4。

3 讨论

本研究通过对比 5.0T 与 3.0T CMR 图像质量、评估二者左心室定量参数的一致性,发现 5.0T CMR 图像质量良好,可用于临床诊断和定量分析。

既往研究^[11]表明,FSE 序列对 B1 场变化高度敏感,使得基于 7.0T MR 行 FSE 序列成像面临巨大挑战,尤其 T2WI 质量更易受损,限制了 7.0T MR 的应用和发展。近期研究^[12-14]发现,并行激发有望缓解 MR 射频激发的不均匀性和能量沉积。联影自主研发了 8 通道发射线圈,结合新型统计初值的射频匀场算法可有效降低 B1 场不均匀性对 UHF 心脏成像的影响。

本研究结果显示 5.0T 和 3.0T CMR 黑血序列的总体图像质量和伪影程度分级差异无统计学意义,说明 5.0T MR 能够进行高质量黑血成像。目前在心脏电影成像方面,bSSFP 序列图像具有高心肌-血池对比,是 3.0T 及 1.5T MR 最常用序列;然而考虑到高 SAR 和安全性问题,该序列极少用于 UHF MRI。FGRE 序列 SAR 较低,且血液和心肌在 UHF 下 T1 弛

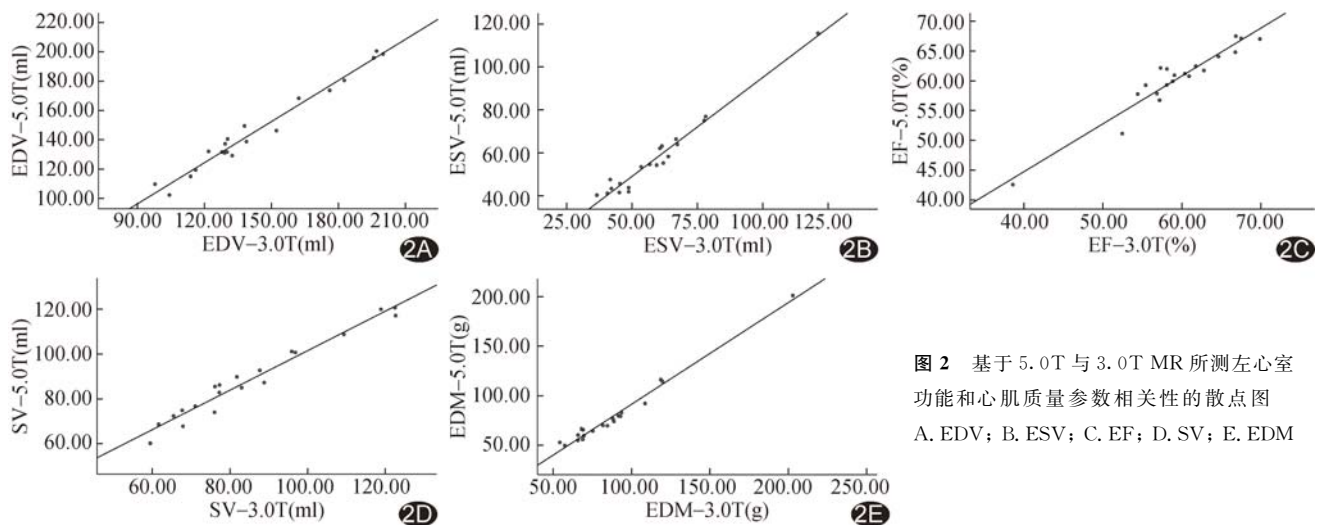


图 2 基于 5.0T 与 3.0T MR 所测左心室功能和心肌质量参数相关性的散点图 A. EDV; B. ESV; C. EF; D. SV; E. EDM

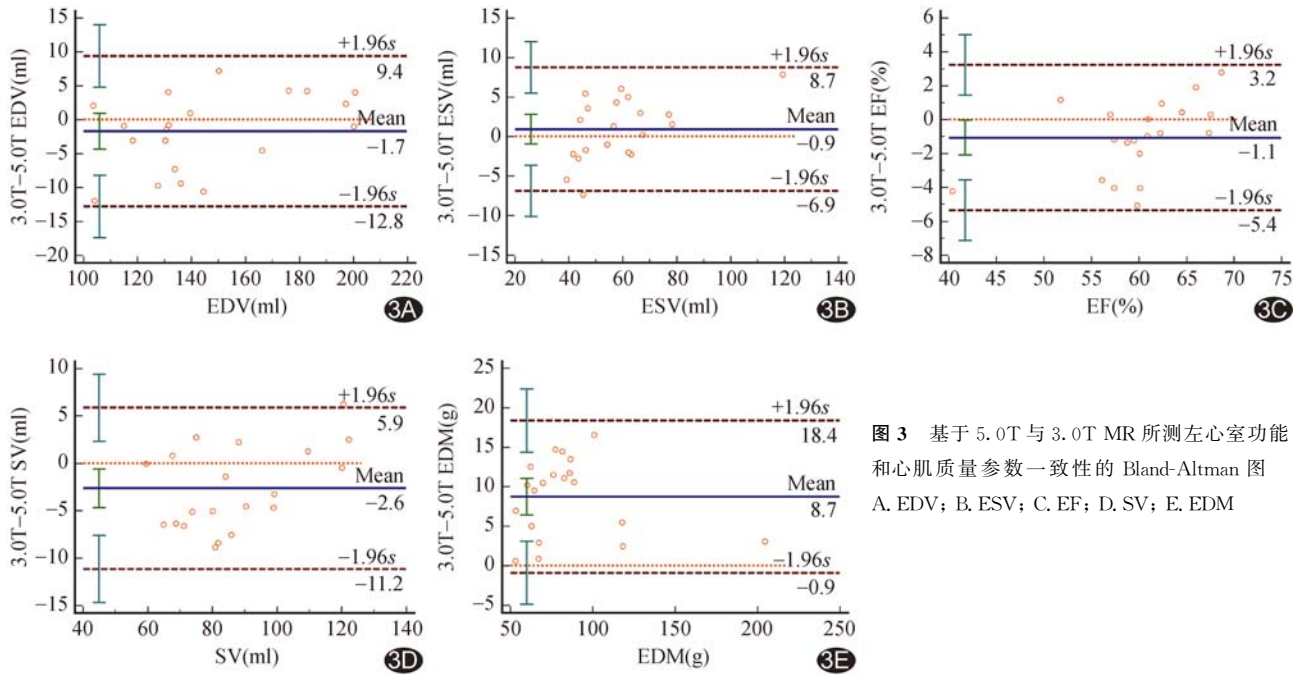


图 3 基于 5.0T 与 3.0T MR 所测左心室功能和心肌质量参数一致性的 Bland-Altman 图
A. EDV; B. ESV; C. EF; D. SV; E. EDM

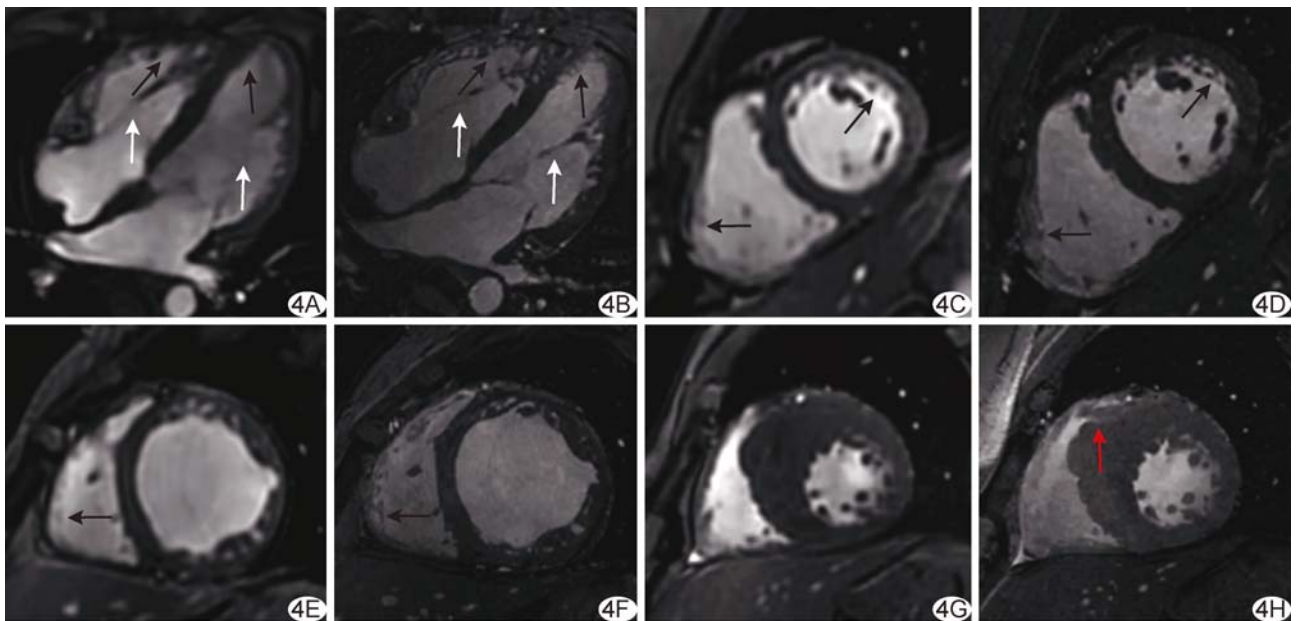


图 4 5.0T 高分辨率 CMR 图 A~D. 30 岁女性健康志愿者, 常规(A)及高分辨率(B)舒张末期四腔心电影图, 常规(C)及高分辨率(D)舒张末期左心室中间段短轴电影图; E, F. 30 岁女性扩张型心肌病患者, 常规(E)及高分辨率(F)舒张末期左心室中间段短轴电影图; G, H. 30 岁男性肥厚型心肌病患者, 常规(G)及高分辨率(H)舒张末期左心室中间段短轴电影图 (黑箭示肌小梁, 白箭示乳头肌和腱索, 红箭示心肌隐窝)

豫时间延长, 可保证较高的心肌-血池对比度^[4], 使其适用于 5.0T MR 成像。本研究中, 5.0T MR FGRE 序列与 3.0T MR bSSFP 电影序列总体图像质量相当, 但偶尔出现的右心室下壁信号减低可能会影响对右室心肌病的评估, 提示应进行更多尝试, 包括采用电介质垫^[15]、改变匀场方式等, 进一步优化 B1 场均匀性。

本研究基于 5.0T MR FGRE 序列与基于 3.0T MR bSSFP 序列图像所获左心室参数具有良好一致性, 与既往 7.0T 与 3.0T/1.5T MR 对比研究^[3,5,7]结果相符, 提示基于 3.0T/1.5T MR 获得的左心室参数参考值范围或同样适用于 5.0T MRI, 有助于 5.0T CMR 成像的推广及应用。

UHF 成像的高 SNR 有助于深入观察心脏细微

解剖结构及分析心肌代谢^[16-18]。本研究初步尝试以 5.0T MR 行高分辨率(1.0 mm×1.0 mm×2.0 mm)成像,所获图像能清晰显示肌小梁、乳头肌和腱索等细微解剖结构。

综上所述,5.0T MR 可用于心脏成像,且其电影序列及黑血序列图像质量与 3.0T MR 相当。本研究的主要局限性:①受 SAR 限制,本研究 5.0T MR 电影序列采用 FGRE 序列,而 3.0T MR 采用 bSSFP 序列,可能影响研究结果;②部分参数观察者间一致性不足;③5.0T 与 3.0T MR 体部接收线圈通道和脊柱接收线圈通道有所差异,亦可能存在影响,有待后续进一步观察。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:兰兰查阅文献、研究设计、撰写和修改文章、经费支持;叶乃力、李轩统计分析;胡慧娟、杜庭屹图像分析;孙文博数据分析;孙荣庆、凌公豪图像处理和分析;宋潇鹏、徐海波指导、审阅文章。

[参考文献]

- [1] 马丽荣,郭家璇,李文玲,等. 4D flow 心脏 MRI 测量左心室血流动力学参数的可靠性[J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(2): 221-225.
- [2] LEINER T, BOGAERT J, FRIEDRICH M G, et al. SCMR Position Paper (2020) on clinical indications for cardiovascular magnetic resonance [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1):76.
- [3] SUTTIE J J, DELABARRE L, PITCHER A, et al. 7 Tesla (T) human cardiovascular magnetic resonance imaging using FLASH and SSFP to assess cardiac function: Validation against 1.5 T and 3 T [J]. NMR Biomed, 2012, 25(1):27-34.
- [4] von KNOBELSDORFF-BRENKENHOFF F, TKACHENKO V, WINTER L, et al. Assessment of the right ventricle with cardiovascular magnetic resonance at 7 tesla [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2013, 15(1):23.
- [5] von KNOBELSDORFF-BRENKENHOFF F, FRAUENRATH T, PROTHMANN M, et al. Cardiac chamber quantification using magnetic resonance imaging at 7 tesla: A pilot study [J]. Eur Radiol, 2020, 20(12):2844-2852.
- [6] SNYDER C J, DELABARRE L, METZGER G J, et al. Initial results of cardiac imaging at 7 tesla [J]. Magn Reson Med, 2009, 61(3):517-524.
- [7] BRANDTS A, WESTENBERG J J, VERSLUIS M J, et al. Quantitative assessment of left ventricular function in humans at 7 T [J]. Magn Reson Med, 2010, 64(5):1471-1477.
- [8] PROTHMANN M, von KNOBELSDORFF-BRENKENHOFF F, TÖPPER A, et al. High spatial resolution cardiovascular magnetic resonance at 7.0 Tesla in patients with hypertrophic cardiomyopathy-first experiences: Lesson learned from 7.0 tesla [J]. PLoS One, 2016, 11(2):e0148066.
- [9] REITER T, LOHR D, HOCK M, et al. On the way to routine cardiac MRI at 7 Tesla: A pilot study on consecutive 84 examinations [J]. PLoS One, 2021, 16(7):e0252797.
- [10] NIENDORF T, SODICKSON D K, KROMBACH G A, et al. Toward cardiovascular MRI at 7 T: Clinical needs, technical solutions and research promises [J]. Eur Radiol, 2010, 20(12): 2806-2816.
- [11] LAADER A, BEIDERWELLEN K, KRAFF O, et al. 1.5 versus 3 versus 7 tesla in abdominal MRI: A comparative study [J]. PLoS One, 2017, 12(11):e0187528.
- [12] STEENSMA B R, VOOGT I J, LEINER T, et al. An 8-channel Tx/Rx dipole array combined with 16 Rx loops for high-resolution functional cardiac imaging at 7 T [J]. MAGMA, 2018, 31(1):7-18.
- [13] ORZADA S, SOLBACH K, GRATZ M, et al. A 32-channel parallel transmit system add-on for 7T MRI [J]. PLoS One, 2019, 14(9):e0222452.
- [14] DENIZ C M. Parallel transmission for ultrahigh field MRI [J]. Top Magn Reson Imaging, 2019, 28(3):159-171.
- [15] IBRAHIM E H, ARPINAR V E, MUFTULER L T, et al. Cardiac functional magnetic resonance imaging at 7T: Image quality optimization and ultra-high field capabilities [J]. World J Radiol, 2020, 12(10):231-246.
- [16] BOTTMOMLEY P A. Sodium MRI in human heart: A review [J]. NMR Biomed, 2016, 29(2):187-196.
- [17] LADD M E, BACHERT P, MEYERSPEER M, et al. Pros and cons of ultra-high-field MRI/MRS for human application [J]. Prog Nucl Magn Reson Spectrosc, 2018, 109:1-50.
- [18] LOTT J, PLATT T, NIESPOREK S C, et al. Corrections of myocardial tissue sodium concentration measurements in human cardiac ²³Na MRI at 7 tesla [J]. Magn Reson Med, 2019, 82(1): 159-173.