

## Application of Free coil in cardiac MRI

SONG Jialin, YIN Gang, DONG Wenhao, CUI Chen, YANG Kai, XU Jing, YANG Xinling,  
LIU Lele, YAN Weipeng, CHEN Lin, HAN Zijuan, LU Minjie\*

(Department of Magnetic Resonance Imaging, Fuwai Hospital, National Center for Cardiovascular Diseases,  
Peking Union Medical College and Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100037, China)

**[Abstract]** **Objective** To observe the value of Free coil applied in cardiac MRI (CMRI). **Methods** Forty patients who would undergo CMRI were prospectively enrolled. Images were acquired with Free coil and a traditional phased-array coil randomly in sequence using the same scanning parameters. Imaging quality, cardiac function parameters, and quantitative analysis of late gadolinium enhancement (LGE) were compared between 2 kinds of images. **Results** The inter-observer consistency was excellent based on 2 kinds of images ( $Kappa=0.86, 0.89$ ). No significant difference of the left nor right ventricular function parameters was found (all  $P>0.05$ ), and the measurement showed excellent consistency (all intra-class correlation coefficient [ICC] $>0.970$ ), especially in terms of left ventricular myocardial mass (ICC=0.999) and end diastolic volume (ICC $\geq 0.997$ ). Bland-Altman plot showed good consistency in left and right ventricular ejection fraction. No significant difference of LGE percentage in LGE positive ones was detected ( $P>0.05$ ), of signal-to-noise ratio and contrast-to-noise ratio (CNR) between 2 kinds of balanced steady-state free precession cine images (both  $P>0.05$ ), nor of CNR of blood pool, normal myocardium and scar myocardium between 2 kinds of enhanced scanning images (all  $P>0.05$ ). **Conclusion** Free coil could be used to obtain cardiac function parameters and imaging quality equivalent to phased-array coil in CMRI.

**[Keywords]** magnetic resonance imaging; free coil; phased-array coil

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.022

## 新型毯式线圈 Free coil 用于心脏 MRI

宋佳林, 尹刚, 董文浩, 崔辰, 杨凯, 徐晶, 杨新令, 刘乐乐,  
闫伟鹏, 陈琳, 韩紫娟, 陆敏杰\*

(中国医学科学院北京协和医学院 国家心血管病中心 阜外医院磁共振影像科, 北京 100037)

**[摘要]** **目的** 观察新型毯式线圈(Free coil)用于心脏 MRI(CMRI)的价值。**方法** 前瞻性纳入 40 例拟接受 CMRI 患者, 随机先后采用 Free coil 或传统相控阵线圈, 以相同扫描参数采集图像; 对比 2 种图像质量、所测心功能参数, 以及针对钆对比剂延迟强化(LGE)的量化分析。**结果** 观察者间基于 2 种图像评估结果的一致性极好( $Kappa=0.86, 0.89$ ), 所测左、右心室心功能参数差异均无统计学意义( $P$ 均 $>0.05$ )且结果一致性极佳[组内相关系数(ICC)均 $>0.970$ ], 尤以左心室心肌质量(ICC=0.999)和舒张末期容积最佳(ICC $\geq 0.997$ )。Bland-Altman 图针对左、右心室射血分数表现出良好一致性。针对 LGE 阳性患者, 基于 2 种图像所获 LGE 百分比差异无统计学意义( $P>0.05$ )。2 种平衡稳态自由进动电影图像的信噪比、对比度噪声比(CNR)差异, 以及增强扫描中的血池、正常心肌及瘢痕心肌间 CNR 差异均无统计学意义( $P$ 均 $>0.05$ )。**结论** 以 Free coil 行 CMRI 可获得与相控阵线圈等效的心功能参数和图像质量。

**[关键词]** 磁共振成像; 新型毯式线圈; 相控阵线圈

**[中图分类号]** R54; R455.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2026)03-0429-05

**[基金项目]** 国家自然科学基金(82471973)、中国医学科学院临床与转化医学研究专项项目(2025-I2M-C&T-A-008)、中国医学科学院阜外医院中央高水平医院临床科研攻关项目(零余额 2025-GSP-GG-5)。

**[第一作者]** 宋佳林(1997—), 男, 黑龙江鹤岗人, 本科, 技师。研究方向: 心血管 MRI 技术。E-mail: 1103109139@qq.com

**[通信作者]** 陆敏杰, 中国医学科学院北京协和医学院 国家心血管病中心 阜外医院磁共振影像科, 100037。E-mail: coolkan@163.com

**[收稿日期]** 2025-11-21 **[修回日期]** 2025-11-28

心脏 MRI(cardiac MRI, CMRI)已在诊断各类心脏病和预测预后中发挥不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>。射频接收线圈对于图像信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR)及分析定量参数的准确性存在直接影响<sup>[4]</sup>。目前临床常用相控阵线圈虽能提供较好的图像质量<sup>[4]</sup>,但其固定结构对部分患者适配性与舒适度存在限制。利用新型毯式线圈(Free coil)可在提升患者舒适度的同时获得与相控阵线圈相当的图像质量<sup>[5-6]</sup>。心脏成像、尤其平衡稳态自由进动电影(balanced steady-state free precession cine, bSSFP cine)和相位敏感反转恢复(phase-sensitive inversion recovery, PSIR)中,图像质量的微小差异可影响诊断准确性<sup>[7-9]</sup>。本研究与传统相控阵线圈对比,观察 Free coil 用于 CMRI 的价值。

### 1 资料与方法

1.1 研究对象 前瞻性纳入 2024 年 12 月—2025 年 1 月于阜外医院 40 例拟接受 CMR 检查患者,其中 19 例接受心脏平扫,男 12 例、女 7 例,年龄 17~69 岁、平均(50.4±14.3)岁;21 例接受心脏增强扫描,男 15 例、女 6 例,年龄 21~75 岁、平均(49.4±16.7)岁。排除标准:①心律不齐(频发期前收缩>5 次/分或心房颤动);②无法自主屏气 10 s 以上;③幽闭恐惧症;④体内非磁兼容植入物(如起搏器、神经刺激器等);⑤拟接受增强扫描者估算肾小球滤过率<30 ml/(min·1.73 m<sup>2</sup>)。本研究获医院伦理委员会批准(2022-1770),患者均知情同意。

1.2 检查方法 采用 Siemens Skyra 3.0T MR 仪,随机先后以 16 通道心脏专属线圈 Free coil(苏州众志医疗科技有限公司)和传统相控阵线圈行仰卧位扫描(扫描间隔时间≤5 min),采集四腔心(4 chamber, 4CH)和短轴(short-axis, SA)bSSFP cine 和 PSIR 序列图像,并从房室瓣口到心尖覆盖左右心室等间距采集 9 层 SA cine 和 SA PSIR 图像。经外周静脉以 2.0 ml/s 流率团注钆贝葡胺 0.10 mmol/kg 体质量并以 20 ml 生理盐水等速冲管,于其后 10~15 min 扫描 PSIR 序列,以 TI Scout 序列确定 TI。具体参数见表 1。

### 1.3 图像质量分析

1.3.1 主观评分 由 2 名具有 5 年以上经验的影像科医师独立评估以 2 种线圈采集的图像质量,顺序为以传统相控阵线圈及 Free coil 采集的 4CH cine、SA cine、4CH PSIR 及 SA PSIR;间隔 24 h 以上进行重复评估。参考解剖结构清晰度、伪影程度对图像进行 5 级评分:1 分,无法诊断(解剖结构无法辨认,伪影严重);2 分,较差(心内外膜边界模糊,诊断价值差);3 分,一般(主要结构可以观察,存在伪影但不影响诊断);4 分,良好(各结构边界清晰,伪影较小);5 分,优秀(无伪影,清晰度对比度最佳)。见图 1、2。意见不一时经协商进行重新评分。将≥3 分图像纳入后续分析。

1.3.2 客观评价 于 Cvi42 平台根据解剖位置、瘢痕区域对所有图像设置 ROI。电影序列选取左心室血池(SA 取中间层)、室间隔心肌和背景 3 个不同区域共 5 个 ROI;PSIR 选取左心室血池和室间隔心肌 2 个 ROI,SA PSIR 额外在明显瘢痕区域设置 1 个 ROI(增强阳性患者),于背景、血池、心肌内及瘢痕区域分别设置面积为 1、1.5 及 3 mm<sup>2</sup> 的类圆形 ROI。记录血池、心肌信号强度(signal intensity, SI),和心肌、背景标准差(standard deviation, SD)。针对电影序列先计算 3 个背景 ROI 的 SD 平均值(SD 背景),再计算 SNR(4CH, SA),即 SI 血池/SD 背景;CNR(4CH, SA)=(SI 血池 - SI 心肌)/SD 背景。基于 PSIR 序列计算 CNR(血池/正常心肌)(4CH, SA)=(SI 血池 - SI 正常心肌)/SD 心肌,对钆对比剂延迟强化(late gadolinium enhancement, LGE)阳性者额外计算 SA CNR(瘢痕/血池)=(SI 瘢痕 - SI 血池)/SD 正常心肌,CNR(瘢痕/正常心肌)=(SI 瘢痕 - SI 正常心肌)/SD 正常心肌。

1.4 定量参数分析 于 Cvi42 基于所有图像进行心功能分析和定量 LGE 分析;自动计算左心室(left ventricular, LV)及右心室(right ventricular, RV)心功能参数,包括射血分数(ejection fraction, EF)、舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV)、收缩末期容积(end-systolic volume, ESV)、心输出量(cardiac output, CO)、

表 1 CMR 扫描序列及参数

| 序列         | FOV (mm) | 层厚 (mm) | 层间距 (mm) | TR (ms) | TE (ms) | FA (°) | 空间分辨率 (mm)  | 时间分辨率 (ms) | 每像素带宽 (Hz/pixel) | Phases |
|------------|----------|---------|----------|---------|---------|--------|-------------|------------|------------------|--------|
| bSSFP cine | 380×330  | 8       | 1~3      | 3.3~3.4 | 1.4     | 50     | 1.6×1.4×8.0 | 40~43      | 900~1 000        | 25     |
| PSIR       | 380×330  | 8       | 1~3      | 5.1~5.2 | 1.9     | 20     | 2.0×1.5×8.0 | —          | 260~300          | —      |

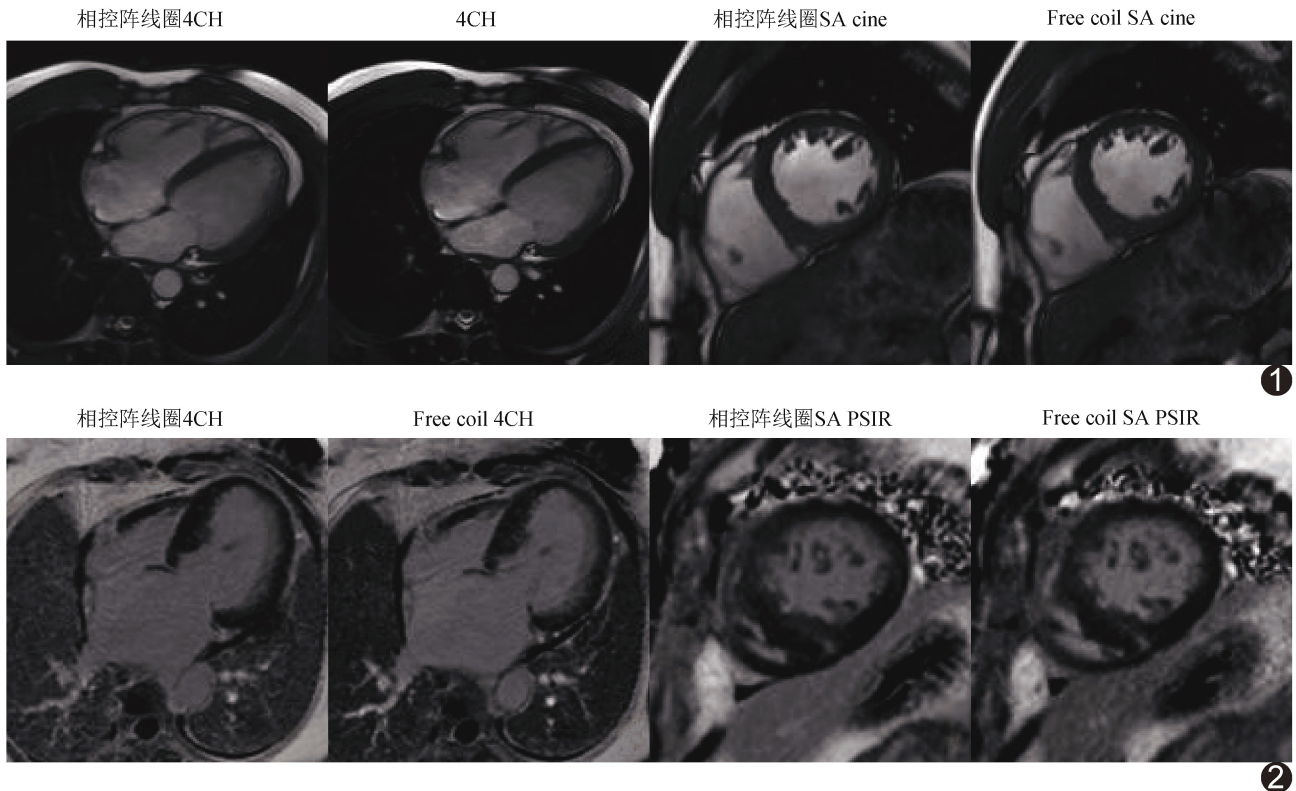


图 1 患者男, 44 岁, 扩张型心肌病, 电影图评分均  $\geq 4$

图 2 患者女, 51 岁, 肥厚型心肌病, LGE 图评分均  $\geq 4$

每搏输出量 (stroke volume, SV) 及 LV 心肌质量 (LVmass)。以信号强度高于正常心肌平均值 6 倍标准差的区域为强化心肌; 以强化心肌质量占总心肌质量的百分比表示 LV LGE 范围, 记为 LGE 百分比 (%)。

1.5 统计学分析 采用 SPSS 27.0 统计分析软件。以  $\bar{x} \pm s$  表示计量资料, 利用配对样本  $t$  检验比较符合正态分布者。利用组内相关系数 (intra-class correlation coefficient, ICC) 和 Bland-Altman 分析评估观察者间测量结果的一致性; 基于 Kappa 检验评估主观评分的一致性,  $Kappa > 0.80$  为一致性极好。以 Cohen's  $d$  评估效应量,  $Cohen's d < 0.2$  为差异无临床意义。  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

2.1 一般资料 40 例中, 肥厚型心肌病 9 例, 扩张型心肌病 3 例, 冠心病 5 例, 高血压性心脏病 7 例, 心力衰竭 4 例, 心肌炎 5 例及其他心脏病 7 例; 其中 12 例 LGE 阳性。19 例接受平扫检查者心率 56~100 次/分、平均  $(70.42 \pm 13.13)$  次/分; 21 例接受增强扫描者心率 50~96 次/分、平均  $(68.52 \pm 11.18)$  次/分。

2.2 图像质量 全部图像评分均  $\geq 3$  分。观察者间基于 2 种图像评估结果的一致性极好 ( $Kappa = 0.86$ 、

0.89)。

2 种 bSSFP cine 图像的 SNR、CNR 差异均无统计学意义 ( $P$  均  $> 0.05$ ), Bland-Altman 分析显示偏倚小 ( $\pm 1.9$ ) 但一致性界限 (limits of agreement, LoA) 较宽 ( $\pm 61.0 \sim \pm 301.4$ ), 见表 2, 提示个体间变异较大但系统误差可忽略。2 种增强扫描图像中, 血池、正常心肌及瘢痕心肌间 CNR 差异均无统计学意义 ( $P$  均  $> 0.05$ )。见表 3。

2.3 对比定量参数 基于 2 种图像所测 LV 及 RV 心功能参数差异均无统计学意义 ( $P$  均  $> 0.05$ ), 见表 4。效应量分析显示, 全部心功能参数的 Cohen's  $d$  均  $\leq 0.07$ , 即临床差异微小。基于 2 种图像测量结果的一致性均极佳 (ICC 均  $> 0.970$ ), 尤以 LVmass (ICC=0.999) 和 EDV (ICC  $\geq 0.997$ ) 最佳。Bland-Altman 图对于 LVEF、RVEF 表现出良好一致性, 见图 3。针对 LGE 阳性患者, 2 种图像所示 LGE 百分比差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ ), 见表 3。

## 3 讨论

CMRI 具有多参数、多序列成像能力, 已成为无创诊断心血管疾病的金标准<sup>[10]</sup>, 而其临床应用价值在很大程度上取决于定量分析的准确性和可重复性<sup>[11]</sup>, 射频接收线圈为其中的关键。

表 2 比较以相控阵线圈与 Free coil 采集的 bSSFP cine 图像质量 (n=19)

| 线圈类型      | SNR <sub>ICH</sub> | SNR <sub>SA</sub> | CNR <sub>ICH</sub> | CNR <sub>SA</sub> |
|-----------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Free coil | 678.30±275.10      | 1 298.10±1013.50  | 460.20±186.50      | 950.10±765.20     |
| 相控阵线圈     | 679.50±274.30      | 1 296.50±1012.30  | 462.10±187.20      | 948.20±764.10     |
| P 值       | 0.958              | 0.983             | 0.901              | 0.972             |
| 偏倚        | 1.2                | -1.6              | 1.9                | -1.9              |
| LoA       | ±92.6              | ±301.4            | ±61.0              | ±221.2            |

表 3 比较以相控阵线圈和 Free coil 行增强扫描所获 LGE 参数 (n=12)

| 线圈类型      | LGE 百分比 (%) | CNR <sub>瘢痕/血池</sub> | CNR <sub>瘢痕/正常心肌</sub> | CNR <sub>血池/正常心肌</sub> |
|-----------|-------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Free coil | 8.50±9.40   | 28.89±12.78          | 35.89±14.56            | 18.89±7.89             |
| 相控阵线圈     | 8.20±9.20   | 29.12±13.45          | 36.45±15.23            | 19.12±8.23             |
| t 值       | 0.756       | 0.378                | 0.412                  | 0.289                  |
| P 值       | 0.456       | 0.712                | 0.823                  | 0.678                  |

表 4 比较以相控阵线圈和 Free coil 所获 bSSFP cine 心功能参数及其一致性 (n=19)

| 线圈类型           | LVEDV (ml)              | LVESV (ml)              | LVEF (%)                | LVSV (ml)               | LVCO (L/min)            | LVmass (g)              |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Free coil      | 167.97±55.89            | 78.65±50.92             | 55.00±13.40             | 87.20±30.50             | 5.89±1.72               | 129.30±50.10            |
| 相控阵线圈          | 168.34±56.21            | 80.12±51.37             | 54.20±14.40             | 85.30±30.10             | 5.81±1.64               | 128.10±50.20            |
| t 值            | -0.487                  | -1.324                  | 0.756                   | 0.645                   | 0.478                   | 0.765                   |
| P 值            | 0.632                   | 0.202                   | 0.458                   | 0.527                   | 0.639                   | 0.454                   |
| Cohen's d 值    | 0.01                    | 0.03                    | 0.06                    | 0.06                    | 0.05                    | 0.02                    |
| ICC 值 (95% CD) | 0.998<br>(0.995, 0.999) | 0.999<br>(0.997, 1.000) | 0.993<br>(0.983, 0.997) | 0.974<br>(0.939, 0.989) | 0.982<br>(0.956, 0.993) | 0.999<br>(0.998, 1.000) |
| 线圈类型           | RVEDV (ml)              | RVESV (ml)              | RVEF (%)                | RVSV (ml)               | RVCO (L/min)            |                         |
| Free coil      | 127.12±46.89            | 55.89±27.84             | 54.90±11.20             | 66.45±25.12             | 4.68±1.45               |                         |
| 相控阵线圈          | 126.34±47.25            | 56.23±28.17             | 54.10±11.80             | 67.12±26.34             | 4.68±1.56               |                         |
| t 值            | 0.612                   | -0.334                  | 0.634                   | -0.456                  | -0.012                  |                         |
| P 值            | 0.548                   | 0.742                   | 0.534                   | 0.654                   | 0.991                   |                         |
| Cohen's d 值    | 0.02                    | 0.01                    | 0.07                    | 0.03                    | 0.00                    |                         |
| ICC 值 (95% CD) | 0.997 (0.992, 0.999)    | 0.998 (0.995, 0.999)    | 0.991 (0.978, 0.996)    | 0.986 (0.966, 0.994)    | 0.994 (0.985, 0.998)    |                         |

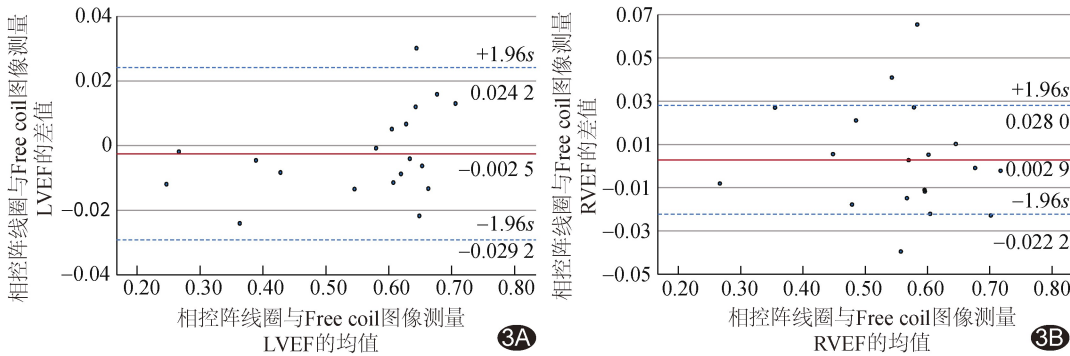


图 3 基于相控阵线圈及 Free coil 采集图像评估 EF 一致性的 Bland-Altman 图 A. LVEF; B. RVEF

传统相控阵线圈通过多个小型线圈单元并行工作而实现大范围、高 SNR 成像,但其体积和质量较大,可能影响患者舒适度,且与体表存在间隙时影响图像质量。近年研发的柔性线圈利用新型纤维导环实现了线圈轻量化与高柔性<sup>[12-13]</sup>,但在心脏领域的应用探索与评估尚属有限。国产 Free coil 表面采用超韧性复合材料以实现电路微量化和电磁场优化,其质量仅 670 g,能在保证图像质量的同时优化患者体验<sup>[14]</sup>,并

较传统线圈更为紧密地贴合胸廓,最小化信号源与接收单元距离、近场信号强度更高,这可能是 2 种电影序列平扫图像 SNR 偏倚小、LoA 较宽的原因;其高密度导线及模块设计能有效补偿柔性线圈深部信号衰减的潜在劣势,线圈单元随解剖形态自然弯曲可增加通道间灵敏度分布的空间差异性,以保证加速扫描状态下的图像质量。

本研究结果显示,Free coil 在提升舒适度的同时完整保留了关键序列参数性能,基于 2 种图像所测心功能参数具有极高一致性 (ICC 均 > 0.970),效应量分析显示差异微小 (Cohen's d 均 ≤ 0.07)。心室壁相对薄而形态不规则,对线圈灵敏度分布极为敏感,本研究

较传统线圈更为紧密地贴合胸廓,最小化信号源与接收单元距离、近场信号强度更高,这可能是 2 种电影序列平扫图像 SNR 偏倚小、LoA 较宽的原因;其高密度导线及模块设计能有效

基于 2 种图像所测 RV 参数具有高度一致性,验证了 Free coil 用于复杂解剖结构成像的可靠性。分析心肌组织特征时,定位心肌瘢痕、判断其范围及透壁程度对于诊断多种心脏疾病和预后判断至关重要<sup>[15]</sup>。本研究以 2 种线圈采集的 LGE 图像质量无明显差异,Free coil 显示出良好性能;且 LGE 百分比亦无明显差异,表明 Free coil 对于心肌瘢痕的检测能力与传统相控阵线圈相当。

综上,Free coil 用于 CMRI 能提供与相控阵线圈等效的参数和图像质量,可为 CMRI 提供新的选择。本研究的主要局限性:样本量有限,尤其 LGE 阳性者仅 12 例,可能影响针对特殊强化模式的分析结果;未纳入心律不齐者,未观察 Free coil 用于 T1 mapping 及 4D flow 等高级序列的表现<sup>[16]</sup>;均有待扩大样本量、纳入更多序列及复杂病例进一步观察。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:宋佳林研究设计和实施、图像处理、统计分析、撰写和修改文章;尹刚和董文浩研究设计和实施、图像处理;崔辰、杨凯和徐晶图像和数据分析;杨新令、刘乐乐、闫伟鹏、陈琳和韩紫娟研究实施、查阅文献;陆敏杰指导、修改和审阅文章、经费支持。

### [参考文献]

- [1] 张华莹,朱乐怡,赵世华,等. 2022 年心脏磁共振研究进展[J]. 磁共振成像, 2023, 14(6):133-138.
- [2] OMMEN S R, HO C Y, ASIF I M, et al. 2024 AHA/ACC/AMSSM/HRS/PACES/SCMR guideline for the management of hypertrophic cardiomyopathy: A report of the American Heart Association/American College of Cardiology Joint Committee on clinical practice guidelines [J]. *Circulation*, 2024, 149(23): e1239-e1311.
- [3] EICHHORN C, KOECKERLING D, REDDY R K, et al. Risk stratification in nonischemic dilated cardiomyopathy using CMR imaging: A systematic review and meta-analysis [J]. *JAMA*, 2024, 332(18):1535-1550.
- [4] KRAMER C M, BARKHAUSEN J, BUCCIARELLI-DUCCI C, et al. Standardized cardiovascular magnetic resonance imaging (CMR) protocols: 2020 update [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020, 22(1):17.
- [5] COREA J R, FLYNN A M, LECHÈNE B, et al. Screen-printed flexible MRI receive coils [J]. *Nat Commun*, 2016, 7:10839.
- [6] COLLICK B D, BEHZADNEZHAD B, HURLEY S A, et al. Rapid development of application-specific flexible MRI receive coils [J]. *Phys Med Biol*, 2020, 65(19):19NT01.
- [7] RAJIAH P S, SUNDARAM B, NG M Y, et al. Artifacts at cardiac MRI: Imaging appearances and solutions [J]. *Radiographics*, 2025, 45(1):e230200.
- [8] SAPRUNGRUANG A, AGUET J, GILL N, et al. Myocardial late gadolinium enhancement using delayed 3D IR-FLASH in the pediatric population: Feasibility and diagnostic performance compared to single-shot PSIR-bSSFP [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2023, 25(1):2.
- [9] STIRRAT J, JONCAS S X, SALERNO M, et al. Influence of phase correction of late gadolinium enhancement images on scar signal quantification in patients with ischemic and non-ischemic cardiomyopathy [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2015, 17(1):66.
- [10] MERLO M, GAGNO G, BARITUSSIO A, et al. Clinical application of CMR in cardiomyopathies: Evolving concepts and techniques: A position paper of myocardial and pericardial diseases and cardiac magnetic resonance working groups of Italian society of cardiology [J]. *Heart Fail Rev*, 2023, 28(1): 77-95.
- [11] SCHULZ-MENGER J, BLUEMKE D A, BREMERICH J, et al. Standardized image interpretation and post-processing in cardiovascular magnetic resonance: 2020 update: Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR): Board of trustees task force on standardized post-processing [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020, 22(1):19.
- [12] COGSWELL P M, TRZASKO J D, GRAY E M, et al. Application of adaptive image receive coil technology for whole-brain imaging [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2021, 216(2): 552-559.
- [13] McGEE K P, STORMONT R S, LINDSAY S A, et al. Characterization and evaluation of a flexible MRI receive coil array for radiation therapy MR treatment planning using highly decoupled RF circuits [J]. *Phys Med Biol*, 2018, 63(8):08NT02.
- [14] FRASS-KRIEGL R, NAVARRO de LARA L I, PICHLER M, et al. Flexible 23-channel coil array for high-resolution magnetic resonance imaging at 3 Tesla [J]. *PLoS One*, 2018, 13(11):e0206963.
- [15] 赵世华. 浅谈心肌疾病的病理影像化 [J]. 磁共振成像, 2020, 11(10):841-842.
- [16] ZHUANG B, SIRAJUDDIN A, ZHAO S, et al. The role of 4D flow MRI for clinical applications in cardiovascular disease: Current status and future perspectives [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(9):4193-4210.