

# 非增强冠状动脉MR血管成像的技术进展与临床应用

胡慧冉, 王科鑫\*

济宁医学院附属医院医学影像科, 山东 济宁

收稿日期: 2026年8月15日; 录用日期: 2026年9月8日; 发布日期: 2026年9月16日

## 摘要

冠状动脉疾病的准确评估对于缺血性心脏病的筛查、诊断和随访至关重要。冠状动脉CT血管成像和有创冠状动脉造影虽已广泛应用, 但分别存在电离辐射、碘对比剂相关风险及有创性等局限。非增强冠状动脉磁共振血管成像(non-contrast coronary magnetic resonance angiography, NC-CMRA)无需电离辐射和对比剂, 且具有良好的软组织对比度高、受钙化影响较小、可重复检查以及便于联合心脏磁共振多参数成像等优点, 尤其适用于儿童、川崎病患者、肾功能不全者及碘对比剂过敏者。近年来, 3.0 T高场强系统、自由呼吸全心成像、Dixon水脂分离、压缩感知、并行成像、快速场回波-平面回波成像及运动校正等技术不断发展, 显著提升了成像效率和图像质量。现有研究表明, NC-CMRA对显著冠状动脉狭窄具有较高敏感度和阴性预测价值, 在冠状动脉起源异常、冠状动脉瘤及川崎病随访中亦具有独特优势。然而, 其空间分辨率、检查成功率和诊断稳定性仍受心率、呼吸模式、磁场不均匀及操作者经验等因素影响, 尚不能完全替代冠状动脉CT血管成像或有创冠状动脉造影。基于2021~2023年相关研究、专家共识及基础文献, 本文综述NC-CMRA的成像原理、技术进展、临床应用、局限和发展方向, 以期为其规范应用与进一步研究提供参考。

## 关键词

冠状动脉, 磁共振血管成像, 非增强成像, 压缩感知, 冠状动脉狭窄, 川崎病

# Non-Contrast-Enhanced Coronary Magnetic Resonance Angiography: Technical Advances and Clinical Applications

Huiran Hu, Kexin Wang\*

Department of Medical Imaging, The Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining Shandong

Received: August 15, 2026; accepted: September 8, 2026; published: September 16, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 胡慧冉, 王科鑫. 非增强冠状动脉 MR 血管成像的技术进展与临床应用[J]. 临床医学进展, 2026, 16(9): 1735-1743. DOI: 10.12677/acm.2026.1693216

## Abstract

Accurate assessment of coronary artery disease is crucial for screening, diagnosis, and follow-up of ischemic heart disease. Although coronary CT angiography and invasive coronary angiography are widely used, both have inherent limitations, including ionizing radiation, iodinated contrast exposure, and invasiveness. Non-contrast coronary magnetic resonance angiography (NC-CMRA) avoids ionizing radiation and contrast agents and offers high soft-tissue contrast, reduced susceptibility to calcification, repeatability, and compatibility with multiparametric cardiac MR, making it particularly suitable for children, patients with Kawasaki disease, renal insufficiency, or contrast allergy. In recent years, advances in 3.0 T systems, free-breathing whole-heart imaging, Dixon water-fat separation, compressed sensing, parallel imaging, turbo field echo-echo planar imaging, and motion correction have markedly improved imaging efficiency and image quality. Current evidence suggests that NC-CMRA has high sensitivity and negative predictive value for significant coronary stenosis and offers unique advantages in the follow-up of anomalous coronary origin, coronary aneurysm, and Kawasaki disease. Nevertheless, its spatial resolution, examination success rate, and diagnostic robustness remain affected by heart rate, rhythm, breathing pattern, magnetic field inhomogeneity, and operator experience, and it cannot yet fully replace coronary CT angiography or invasive angiography. Based on studies published from 2021 to 2023, expert consensus statements, and foundational literature, this review summarizes the imaging principles, technical advances, clinical applications, limitations, and future directions of NC-CMRA to support standardized use and further research.

## Keywords

Coronary Artery, Magnetic Resonance Angiography, Non-Contrast Imaging, Compressed Sensing, Coronary Stenosis, Kawasaki Disease

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冠心病是常见的心血管疾病, 对冠状动脉解剖和管腔狭窄程度的准确评价直接影响风险分层与治疗决策。有创冠状动脉造影(coronary angiography, CAG)具有很高的时空分辨率, 仍是评价冠状动脉狭窄的重要参考标准, 但其有创性使其不适合作为一般人群筛查及频繁随访的常规手段。冠状动脉 CT 血管成像(coronary computed tomography angiography, CCTA)成像速度快、空间分辨率高, 是目前主要的无创冠状动脉成像方法, 但需要使用碘对比剂, 并涉及电离辐射; 严重钙化还可能因部分容积效应和开花伪影而影响管腔判断。

冠状动脉磁共振血管成像(coronary magnetic resonance angiography, CMRA)能够无创显示冠状动脉起源、走行、管腔和部分管壁信息。非增强 CMRA 进一步避免了钆对比剂使用, 在儿童、孕妇、肾功能不全、碘或钆对比剂过敏以及需要重复随访的人群中具有吸引力。2021 年我国专家共识将儿童冠状动脉起源及发育异常、冠状动脉扩张或动脉瘤的诊断与随访, 以及中低风险冠心病患者冠状动脉主干病变筛查列为主要适应证, 尤其强调其在 CCTA 禁忌患者中的价值[1]。因此, NC-CMRA 更适宜被理解为 CCTA 与 CAG 的补充工具, 而非简单替代手段。

## 2. 成像基础与检查策略

冠状动脉直径小、走行迂曲, 同时受心脏搏动和呼吸运动双重影响, 且其周围心肌、静脉及心外膜脂肪会降低血管对比度。因此, CMRA 必须在空间分辨率、时间分辨率、信噪比和扫描时间之间取得平衡。其基本技术链包括心电同步、呼吸运动控制、亮血序列、脂肪及心肌信号抑制、三维数据采集和图像后处理[2]。

心电门控的目的在于将数据采集限定于冠状动脉运动相对静止期。低而稳定的心率通常有利于舒张中晚期采集; 当心率较快时, 收缩末期可能具有更稳定的静止窗。频发早搏、房颤或明显心率漂移会破坏不同心动周期数据的一致性, 是检查失败的重要原因。检查前应通过电影序列观察右冠状动脉运动并确定个体化采集窗, 而不能仅使用固定延迟时间。

呼吸运动控制主要分为屏气采集和自由呼吸采集。传统靶容积屏气成像时间短, 但覆盖范围有限, 往往需要分别规划不同冠脉; 自由呼吸全心三维成像可一次覆盖冠状动脉树, 便于多平面重组和曲面重组, 已成为临床研究的主要路径。膈肌导航门控仅接受特定呼吸窗内的数据, 窄接受窗可减少运动伪影, 却会降低采集效率并延长检查时间。已有研究还提出将全心成像与靶容积成像结合, 以改善可疑节段的评价[3]。近年来的自导航、图像导航和非刚性运动校正尝试直接追踪心脏位移, 有望降低对规则呼吸的依赖[4][5]。

在序列选择方面, 1.5 T 系统常采用平衡稳态自由进动(balanced steady-state free precession, bSSFP)序列, 其血液信号高、血液与心肌对比良好。3.0 T 系统具有更高的理论信噪比, 可用于提高空间分辨率或缩短扫描时间, 但磁场和射频场不均匀、磁敏感伪影及比吸收率升高会限制 bSSFP 表现。梯度回波或快速场回波序列对场不均匀相对不敏感, 在 3.0 T 上具有实用价值。脂肪抑制、T2 准备脉冲及 Dixon 水脂分离可进一步提高冠脉与周围组织对比度。

## 3. 近年来的关键技术进展

### 3.1. 3.0 T 与 Dixon 水脂分离

3.0 T 带来的信噪比储备为高分辨率全心成像及加速采集提供了基础, 但其收益并非自动转化为更好的诊断图像。传统频率选择性脂肪抑制容易受到 B0 不均匀影响, Dixon 技术利用水脂化学位移差异重建水相和脂相图像, 脂肪抑制更均匀, 因而适合 3.0 T 冠状动脉成像。鲁鸿飞等[6]将 Dixon 水脂分离与压缩感知并行成像结合, 在 53 例拟行 CAG 的疑似冠心病患者中完成前瞻性研究。46 例成功获得全心图像, 成功率为 86.8%, 平均成像时间为 $(7.8 \pm 1.8)$  min。以管腔直径减少 $\geq 50\%$ 为显著狭窄, 患者水平的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和准确度分别为 95.8%、81.8%、85.2%、94.7%和 89.1%, 提示该方案尤其具有排除显著狭窄的潜力。然而, 该研究样本较小且来自单中心, 7 例采集失败也说明实际成功率仍受患者状态及技术条件制约。

### 3.2. 压缩感知与并行成像

并行成像利用多通道线圈灵敏度差异减少相位编码, 但加速因子升高会导致信噪比损失及残余折叠伪影。压缩感知(compressed sensing, CS)通过随机欠采样、图像稀疏变换和迭代重建, 在减少采集数据的同时维持主要结构信息。CS 与敏感度编码(sensitivity encoding, SENSE)结合后, 可在扫描速度、噪声与细小血管显示之间寻找新的平衡。

胡献阁等[7]比较 31 例疑似冠心病患者的常规 SENSE 2 与 CS 加速因子 4、5、6。CS4、CS5 和 CS6 扫描时间分别为 $(269 \pm 36)$  s、 $(214 \pm 29)$  s 和 $(178 \pm 26)$  s, 较 SENSE 2 的 $(343 \pm 46)$  s 缩短 21.5%、37.5%

和 48.0%。CS4 的主观评分及冠状动脉 - 心肌信号对比度与 SENSE 2 差异无统计学意义, 而更高加速因子在部分或全部节段出现图像质量下降。因此, 加速并非越高越好; 在该研究参数体系中, CS4 体现了较合理的速度与质量折中。不同厂家、线圈配置和重建算法不能直接套用同一加速阈值, 仍需本地验证。

### 3.3. 单次屏气快速采集

自由呼吸全心成像覆盖完整, 但其时间不确定, 易受呼吸漂移影响。快速场回波 - 平面回波成像(turbo field echo-echo planar imaging, TFE-EPI)通过结合 TFE 与 EPI 读出提高采集效率。李玮等[8]在 23 名健康志愿者中比较单次屏气 TFE-EPI 与自由呼吸 TFE, 采集时间由 $(466.9 \pm 101.3)$ s 缩短至 $(16.3 \pm 2.2)$ s, 降幅达 96.51%。两序列各评价部位的信噪比无显著差异, TFE-EPI 在右冠状动脉中段的对比噪声比、伪影以及右冠近中段锐利度方面还显示一定优势。该研究证明了极速采集的可行性, 但对象均为健康志愿者, 尚缺乏对狭窄病变、心律不齐及不能稳定屏气人群的诊断验证。EPI 固有的磁敏感和几何变形风险也需在更大样本中评价。

### 3.4. 全心与靶容积成像的互补

全心成像操作相对简化、覆盖广, 靶容积成像则可围绕特定冠脉优化空间分辨率和信号。王峰等[9]对 58 名受试者进行两次全心及靶容积平衡稳态自由进动(balanced steady-state free precession, bSSFP)无对比剂冠状动脉 MR 血管成像, 主观评分、血管 - 心肌相对信号比及血管 - 脂肪相对信号比的观察者间和观察者内一致性良好, 多数指标重复扫描可重复性尚可。靶容积原始图像的总体主观评分及相对信号指标优于全心成像, 而全心图像经曲面重组后的冠状动脉主干总体评分更高, 说明二者并不存在绝对优劣。临床上可先采用全心扫描完成总体评价, 再对可疑节段或关键血管追加靶容积扫描。不过该研究以受试者冠状动脉主干显示为主, 并未直接证明该组合可以提高疾病诊断结局。

## 4. 临床应用进展

### 4.1. 冠状动脉狭窄筛查

现有证据支持 NC-CMRA 对显著冠状动脉狭窄具有较高敏感度和阴性预测价值。不过, 其低特异性意味着阳性或边界性结果并不罕见, 后续常需 CCTA、灌注成像或 CAG 复查, 因而会带来额外检查负担。一项纳入 417 例患者的系统评价与 Meta 分析显示, 在患者水平检出 $\geq 50\%$ 狭窄的合并敏感度和特异度分别为 90.3%和 77.9%; 血管水平分别为 83.7%和 90.9%[10]。这意味着 NC-CMRA 更适合中低验前概率患者的排除性评估, 而阳性或可疑结果通常仍需进一步确认。鲁鸿飞等[6]在 3.0 T Dixon 联合 CS-SENSE 方案中获得患者水平 94.7%的阴性预测值, 与这一定位一致。

NC-CMRA 不受钙化开花伪影干扰, 原因在于其主要依赖流动血液的高信号和背景抑制后的管腔轮廓, 而不是 X 线衰减; 钙化本身在 MR 中几乎不产生可用信号, 也不会像 CT 那样因高密度边缘扩散而把管腔“放大遮盖”, 因此对重度钙化导致的 CCTA 管腔遮挡具有补充价值。同时, CMRA 可与心室功能、心肌灌注、心肌水肿、延迟钆增强或无对比剂组织定量联合, 构成冠状动脉解剖与心肌后果的“一站式”评估。但 CMRA 对远端细小分支、支架内管腔及严重运动伪影患者, NC-CMRA 能力仍有限。支架金属相关伪影可能使支架段无法诊断, 不能因多数冠脉支架具备 MR 检查安全性而等同于支架内管腔可评价。

### 4.2. 冠状动脉起源及走行异常

冠状动脉起源异常多见于儿童和年轻人, 评价重点是血管起源、近段走行及其与主动脉和肺动脉的

空间关系。NC-CMRA 无辐射、三维覆盖范围大、软组织对比良好, 适合年轻患者及需要复查者。其还可显示心肌桥的位置和走行, 但对桥血管动态受压程度的评估需要结合电影或其他功能学信息。对于疑似恶性走行、症状与解剖不一致或图像质量不佳者, 仍需多模态验证。

### 4.3. 川崎病及冠状动脉瘤随访

川崎病患儿可能出现冠状动脉扩张、动脉瘤、血栓及后期狭窄, 需要长期甚至终身随访。经胸超声心动图(transthoracic echocardiography, TTE)便捷且无辐射, 是基础检查, 但易受声窗和操作者影响, 对右冠状动脉及中远段显示有限。文凌仪等[11]纳入 75 例川崎病患儿, 所有患儿均成功完成 3.0 T 无对比剂 CMRA; 其中 26 例以 CCTA 或 CAG 为参考。按血管分析, CMRA 检出冠状动脉瘤的敏感度为 97.7%, 高于 TTE 的 84.1%; 对近段和中远段病变的敏感度分别为 96.2%和 100%, TTE 则为 71.2%和 52.4%。在 75 例患儿中, CMRA 发现 115 个冠状动脉瘤, TTE 显示其中 87 个; CMRA 还发现 8 例血栓, 其中 5 例未被 TTE 观察到。该结果突出显示 CMRA 在右冠及中远段病变中的补充价值。不过以 CCTA/CAG 作为参考的仅 26 例, 且儿童检查可能涉及镇静管理, 仍需多中心前瞻性研究确认不同年龄和病程阶段的效果。

### 4.4. 特殊人群

NC-CMRA 避免碘对比剂和钆对比剂, 因而适合肾功能不全及对比剂过敏患者, 也可用于需要降低累积辐射的儿童和重复随访人群。对妊娠患者则应基于临床必要性、孕周、设备条件和多学科意见个体化决策, “无电离辐射”并不等同于可以无指征检查。对于高心率、绝对心律不齐、不能配合屏气或呼吸极不规则者, NC-CMRA 成功率下降, 需优先选择更适合患者状态的方案。

## 5. NC-CMRA 的技术挑战与临床定位

### 5.1. 适用人群与诊断流程中的位置

对疑似稳定性胸痛或慢性冠脉综合征患者, 首先应结合年龄、性别、症状和危险因素进行临床可能性评估, 而不是把 NC-CMRA 当作普筛工具。对于低至中等临床可能性、又希望避免电离辐射或碘对比剂暴露的患者, NC-CMRA 可作为无创解剖学评估的备选方案; 而高临床可能性、心电不稳或具有高危症状与体征者, 更应优先考虑功能学检查或有创冠状动脉造影[12]。换言之, NC-CMRA 更适合放在“靶向分诊”而非“终点确诊”的位置。

其真正优势在于避免电离辐射和对比剂, 但这一优势必须与代价同步评估。由于患者水平特异度并不高, 假阳性和边界性结果会把一部分患者推向后续 CCTA、灌注检查或 CAG, 从而增加排队时间、经济负担和患者焦虑[10]。所谓“一站式”评估在理念上可以同时回答解剖与功能两个问题, 但在实际临床操作中仍受预约时长、患者耐受、序列衔接和阅片负荷限制, 阳性或不确定结果往往仍需二次检查。

### 5.2. 空间/时间分辨率的量化差异

以近期文献为例, 临床可行的 NC-CMRA 多为约 1.0 mm 各向同性空间分辨率, 全心采集通常需要数分钟; 而当代 CCTA 可达到约 0.2~0.6 mm 空间分辨率, 并具有约 66~175 ms 的硬件时间分辨能力[13][14]。因此, NC-CMRA 的优势并不体现在时间或空间分辨率优于 CCTA, 而在于其无电离辐射、无需碘对比剂及软组织对比度较高等特点; 临床应用时需充分认识其采集时间较长、时空分辨率相对有限的技术属性。

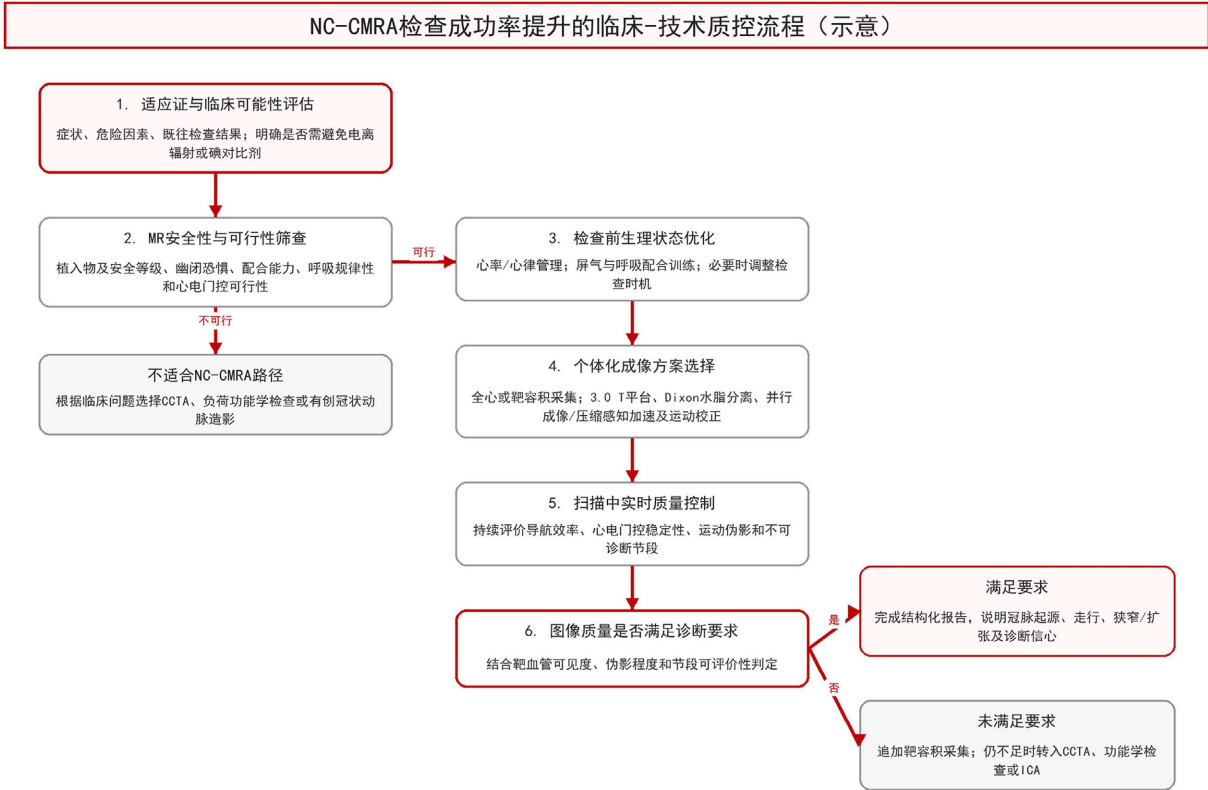
### 5.3. 常见伪影及校正

NC-CMRA 常见伪影包括心动相关模糊、呼吸漂移导致的周期性错位, 以及 B0/B1 不均匀造成的条

带伪影或脂肪抑制失败[1][2][4]-[6];在压缩感知或并行成像加速条件下,还可能出现噪声放大、残余混叠及边缘伪锐化等重建相关伪影[6][7]。上述伪影导致的图像质量下降并非单一因素所致,而是心脏搏动、呼吸运动、磁场不均匀及欠采样重建误差等多种因素相互叠加的结果。相应的校正策略包括个体化心电门控、导航或自导航、非刚性运动校正、Dixon 水脂分离、合理设定 CS/SENSE 加速因子,以及在图像质量下降时回退到靶容积成像或其他无创检查。

#### 5.4. 提高检查成功率的临床与技术策略

NC-CMRA 检查成功率的提升应建立在标准化患者选择、检查前状态优化、成像方案个体化及全过程质量控制的基础上,而非仅依赖扫描现场的参数调整。建议检查前完成临床可能性评估及 MR 安全性筛查,明确植入物安全等级、幽闭恐惧、呼吸配合能力和心电门控可行性等限制因素;对心率偏快、心律不齐或呼吸配合欠佳者,应在临床条件允许时进行心率/心律管理及呼吸训练;成像方案宜结合设备平台、患者体型和目标血管选择全心或靶容积采集,并合理联合 3.0 T 平台、Dixon 水脂分离、并行成像或压缩感知加速及运动校正技术。扫描过程中应动态评价导航效率、心电门控稳定性、运动伪影和不可诊断节段;若图像质量不能满足诊断要求,应及时追加靶容积采集,或根据临床问题转入 CCTA、负荷功能学检查或有创冠状动脉造影。具体临床 - 技术质控流程见图 1。



注: 流程强调检查前分层、患者状态优化、协议个体化和扫描中质量控制的连续管理。图源: 依据 2021 年专家共识 [1]、相关综述[4][5]及代表性研究[6]-[11]综合绘制。

**Figure 1.** Clinical-technical quality-control workflow for improving NC-CMRA examination success

**图 1.** NC-CMRA 检查成功率提升的临床 - 技术质控流程图

总体而言, NC-CMRA 更像一种风险定向的无创排除性检查,而非可普遍替代其他冠脉检查的终点

方案。

## 6. 代表性研究比较

代表性 NC-CMRA 研究的设计、主要结果与局限性见表 1。

**Table 1.** Representative NC-CMRA studies and their limitations

**表 1.** 代表性 NC-CMRA 研究及其局限性

| 研究                 | 对象与设计                        | 主要技术                      | 主要结果                                           | 主要限制              | 研究局限性               |
|--------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|-------------------|---------------------|
| 鲁鸿飞等<br>[6], 2022  | 53 例疑似冠心病, 前瞻性, 以 CAG 为参照    | 3.0 T、Dixon、CS-SENSE 全心成像 | 成功率 86.8%, 时间 7.8 min; 患者水平敏感度 95.8%、特异度 81.8% | 单中心、小样本, 存在采集失败   | 单中心、小样本, 存在采集失败     |
| 胡献阔等<br>[7], 2023  | 31 例疑似冠心病, 序列自身对照            | SENSE 2 与 CS4/5/6         | CS4 缩时 21.5%且质量与 SENSE 2 相近; 过高加速降低质量          | 参数和最佳因子可能受平台影响    | 平台依赖明显, 最佳因子需本地验证   |
| 李玮等[8],<br>2022    | 23 名健康志愿者, 序列自身对照            | 单次屏气 TFE-EPI 与自由呼吸 TFE    | 时间缩短 96.51%, 部分右冠指标更优                          | 无患者及诊断效能验证        | 无患者结局验证             |
| 王峰等[9],<br>2022    | 58 名受试者, 两次重复扫描              | 全心与靶容积 bSSFP              | 两种方式总体可重复性较好, 各具优势                             | 以图像质量为终点, 未验证疾病诊断 | 以图像质量为终点, 未验证诊断结局   |
| 文凌仪等<br>[11], 2022 | 75 例川崎病患者; 26 例有 CCTA/CAG 参照 | 3.0 T 无对比剂 CMRA           | 血管水平瘤体检出敏感度 97.7%, 中远段优势明显                     | 仅部分患儿具有参考标准, 单中心  | 仅部分病例有参考标准, 且可能涉及镇静 |

首先, 空间分辨率仍是 NC-CMRA 与 CCTA、CAG 之间的主要差距。冠状动脉远段、细小分支和轻度狭窄容易受部分容积效应影响, 信号下降既可能源于真实狭窄, 也可能来自运动、流动、离共振或脂肪抑制失败。由此造成的假阳性是其特异度相对有限的重要原因。

其次, 检查时间和成功率仍不够稳定。导航接受率取决于患者呼吸规律, 心率变化和心律不齐会导致采集窗错位; 过长检查又反过来增加患者运动。快速屏气、CS 和深度学习重建可缩短扫描, 但过度欠采样可能抹去细小血管或产生具有“锐利外观”的重建偏差。因此, 新算法不仅要比较主观图像评分, 还应以 CCTA 或 CAG 为参照报告患者、血管和节段水平诊断效能, 并公开不可诊断节段和检查失败病例。

再者, 扫描和报告标准化不足。不同厂家对 bSSFP、TFE、GRE、Dixon、导航及 CS 的命名和实现不同, 最佳参数难以直接迁移。检查前应评估 MR 禁忌证、植入物条件安全性、心率、心律、呼吸配合及用药禁忌; 扫描中应记录心率和导航效率; 报告中应说明图像质量、不可评价节段、异常起源、走行、管腔改变和附带心脏发现。开展科室还需建立技师、诊断医师和护理人员协作的质量控制体系[1]。

未来研究应沿三条路径推进: 一是通过自导航、非刚性运动校正、低秩或稀疏重建及深度学习, 实

现更短、更稳定的高分辨率自由呼吸全心成像；二是由单纯管腔形态向管壁、斑块特征、血流和功能学量化延伸，并与心肌灌注及组织定量整合；三是开展大样本、多中心、跨设备研究，统一病变定义和不可诊断病例处理方法，评价其对临床决策、预后及成本效益的真实影响。人工智能还可用于冠脉中心线提取、自动分段、图像质量控制和狭窄定量，但应重视外部验证、可解释性以及不同平台间泛化。

## 7. 局限、规范化需求与未来方向

近年来，3.0 T 系统、Dixon 水脂分离、CS-SENSE、快速 TFE-EPI 及运动校正推动 NC-CMRA 从可行性研究逐渐走向临床应用。现有材料表明，该技术在显著狭窄的排除性评估、儿童冠脉异常及川崎病冠状动脉瘤随访中价值突出，尤其适合需避免辐射或对比剂的人群。但其检查成功率、远端血管显示、特异度与跨平台稳定性仍不足，当前定位应是针对合适患者的补充性无创检查。未来通过标准化流程、快速高分辨率成像和多中心结局研究，NC-CMRA 有望成为冠状动脉精准、低风险和可重复评估的重要组成部分。

## 基金项目

项目等级：市级；项目名称：非增强磁共振冠状动脉成像技术在冠心病诊断中应用研究；项目编号：2024YXNS076。

## 参考文献

- [1] 中国医学装备协会磁共振应用专业委员会. 冠状动脉 MR 血管成像临床应用专家共识(第一版) [J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(9): 895-902.
- [2] 刘新, 杨旗, 李坤成, 等. 冠状动脉 MR 血管成像的研究进展[J]. 中华放射学杂志, 2009, 43(12): 1340-1343.
- [3] Lin, L., Wang, L., Zhang, X., Li, X., Wang, J., Shen, Z., *et al.* (2021) A Clinical Strategy to Improve the Diagnostic Accuracy of 1.5-T Non-Contrast MR Coronary Angiography for Detection of Coronary Artery Disease: Combination of Whole-Heart and Volume-Targeted Imaging. *European Radiology*, **31**, 1894-1904. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07135-7>
- [4] 王怡宁, 金征宇. 冠状动脉 MR 血管成像面临的机遇和挑战[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(10): 1047-1050.
- [5] 王正福, 朱玥, 高波. 非对比冠状动脉 MR 血管成像研究进展[J]. 中华放射学杂志, 2023, 57(2): 216-220.
- [6] 鲁鸿飞, 田地, 赵士海, 等. 3.0 T 非增强 Dixon 水脂分离压缩感知冠状动脉 MR 血管成像诊断冠状动脉狭窄的效能研究[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(10): 1051-1057.
- [7] 胡献阔, 侯唯姝, 张杨, 等. 基于压缩感知技术 3.0 T MR 无对比剂冠状动脉血管成像的临床应用可行性[J]. 中华放射学杂志, 2023, 57(4): 385-389.
- [8] 李玮, 崔晨, 刘佳, 等. TFE-EPI 序列与 TFE 序列在 3.0 T 非增强冠状动脉 MR 血管成像中的对比研究[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(10): 1064-1068.
- [9] 王峰, 庄少斌, 郭伟, 等. 平衡稳态自由进动序列无对比剂冠状动脉 MR 血管成像不同扫描方式的可重复性研究[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(10): 1069-1075.
- [10] Zahergivar, A., Kocher, M., Waltz, J., Kabakus, I., Chamberlin, J., Akkaya, S., *et al.* (2021) The Diagnostic Value of Non-Contrast Magnetic Resonance Coronary Angiography in the Assessment of Coronary Artery Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Heliyon*, **7**, e06386. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06386>
- [11] 文凌仪, 周忠琴, 伏川, 等. 3.0 T 无对比剂冠状动脉 MR 血管成像在川崎病儿童的应用价值[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(10): 1058-1063.
- [12] Vrints, C., Andreotti, F., Koskinas, K.C., Rossello, X., Adamo, M., Ainslie, J., *et al.* (2024) 2024 ESC Guidelines for the Management of Chronic Coronary Syndromes. *European Heart Journal*, **45**, 3415-3537. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehae177>
- [13] Hajhosseiny, R., Munoz, C., Cruz, G., Khamis, R., Kim, W.Y., Prieto, C., *et al.* (2021) Coronary Magnetic Resonance Angiography in Chronic Coronary Syndromes. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **8**, Article 682924. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.682924>

- 
- [14] Occhipinti, M., Clemente, A., De Gori, C., Positano, V., Neglia, D., Celi, S., *et al.* (2026) Ultra-High Spatial Resolution at Photon-Counting Computed Tomography: Technical Insights and Sustainable Applications in Cardiothoracic Imaging. *European Radiology Experimental*, **10**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/s41747-025-00656-0>