

CCTA及CT-FFR在冠状动脉先天变异患者中的诊断与应用价值文献综述

李 萌, 甘信涛, 陈 震, 毛 亮*

济宁医学院附属医院医学影像科, 山东 济宁

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年4月28日; 发布日期: 2026年5月8日

摘 要

冠心病作为临床最常见的心血管疾病之一, 其发病率和致死率长期居高不下, 对患者的生命健康构成严重威胁。然而在日常工作中冠状动脉先天变异患者容易被忽视, 但其可能会引起严重的临床事件。因此精准的冠状动脉解剖学评估与功能学评价是制定科学临床决策的核心依据。冠状动脉CT血管成像(CCTA)凭借其无创、高分辨率的特点, 已成为临床评估冠脉解剖结构的重要工具。而基于CCTA图像计算的血流储备分数(CT-FFR)在诊断心肌缺血、评估斑块进展及预测主要不良心血管事件方面展现出巨大潜力。目前CCTA及CT-FFR在冠状动脉变异诊断及评价中已经广泛应用。

关键词

冠状动脉变异, CT血管成像, 血流储备分数

A Literature Review on the Diagnostic and Application Value of CCTA and CT-FFR in Patients with Congenital Coronary Artery Variations

Meng Li, Xintao Gan, Zhen Chen, Liang Mao*

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

Received: April 7, 2026; accepted: April 28, 2026; published: May 8, 2026

Abstract

As one of the most common cardiovascular diseases in clinical practice, coronary heart disease has

*通讯作者。

文章引用: 李萌, 甘信涛, 陈震, 毛亮. CCTA 及 CT-FFR 在冠状动脉先天变异患者中的诊断与应用价值文献综述[J]. 临床医学进展, 2026, 16(5): 391-396. DOI: 10.12677/acm.2026.1651829

long exhibited persistently high incidence and mortality rates, posing a serious threat to patients' life and health. However, in routine clinical work, patients with congenital coronary artery variations are often overlooked, despite their potential to cause severe clinical events. Therefore, precise anatomical assessment and functional evaluation of the coronary arteries are essential for establishing a scientific clinical strategy. Coronary computed tomography angiography (CCTA), with its non-invasive and high-resolution characteristics, has become an important tool for clinically evaluating coronary artery anatomy. Meanwhile, the CT-derived fractional flow reserve (CT-FFR) based on CCTA images has shown great potential in diagnosing myocardial ischemia, assessing plaque progression, and predicting major adverse cardiovascular events. Currently, CCTA and CT-FFR are widely applied in the diagnosis and evaluation of coronary artery variations.

Keywords

Coronary Artery Variation, CT Angiography, Fractional Flow Reserve

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/>



1. 引言

近年来, 冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)已成为临床诊断冠状动脉疾病及评估冠脉解剖结构的重要工具[1] [2]。长期以来, 有创冠状动脉造影(ICA)被视为评估冠脉狭窄的“金标准”, 但它仅提供解剖学信息, 无法直接反映病变是否导致心肌缺血[3]。而基于 CCTA 图像计算的血流储备分数(CT-FFR)技术的出现, 更是将冠脉评估从单纯的解剖学维度拓展至功能学维度, 能够无创地评估狭窄病变对血流动力学的影响[4]-[9]。在临床实践中, 冠状动脉先天变异(包括起源异常、走行异常、终止异常等)虽然相对少见, 但其临床意义不容忽视。部分变异可能与心肌缺血、心绞痛甚至猝死等严重临床事件相关[10]; 而另一些变异(如左冠状动脉高位开口)则被认为是良性解剖变异, 对心肌血运无明显影响[11]。准确识别并评估这些变异, 对于指导临床介入治疗、避免手术并发症以及进行危险分层至关重要[12]。CCTA 凭借其卓越的空间分辨率和多样的后处理技术, 已成为诊断冠脉先天变异的首选无创影像学方法[13]。

2. CT-FFR 在冠状动脉疾病精准评估中的研究进展

随着冠心病诊疗理念从单纯的“解剖学狭窄”向“功能学缺血”转变, CT-FFR 作为一项无创评估冠脉病变功能学意义的新技术, 受到了学界的广泛关注。其核心价值在于, 能够在一次 CCTA 检查中, 同时获取冠脉的解剖学形态(狭窄程度、斑块特征)和功能学信息(血流动力学状态), 为临床决策提供更为全面的依据[14]。

2.1. CT-FFR 与心肌缺血的诊断价值

多项研究证实了 CT-FFR 在诊断心肌缺血方面的高准确性[15] [16]。陈进等人的研究发现, 基于人工智能的 CT-FFR 测量在诊断冠状动脉缺血性病变时, 其诊断准确度(96%)、灵敏度(97.93%)和特异度(90.91%)均显著高于传统的 CCTA 检查[17]。这一结果凸显了 CT-FFR 在弥补单纯解剖学评估不足方面的优势。周康锴等人的研究也得出相似结论, 以 ICA 为金标准, CT-FFR 诊断冠状动脉缺血病变的曲线下面积(AUC)为 0.86, 显著高于 CCTA 的 0.706 [1]。这表明 CT-FFR 在识别真正引起心肌缺血的病变方面更具效能。

除了诊断缺血性病变, CT-FFR 还被用于探讨斑块特征与心肌缺血的关系。费锋等人的研究通过 Logistic 回归分析发现, 斑块总体积、钙化斑块体积、斑块长度、钙化积分以及管腔中重度狭窄等均是诱发心肌缺血的影响因素[18]。徐敏和瞿华的研究则指出, 管腔狭窄程度和斑块体积是冠心病患者心肌缺血的独立影响因素[19]。这些研究共同表明, CT-FFR 不仅能判断是否存在缺血, 还能与斑块的定量参数相结合, 更深入地揭示心肌缺血的病理生理基础。

2.2. CT-FFR 与斑块特征、钙化程度的关联

CT-FFR 的价值不仅在于诊断缺血, 还在于它与斑块特征和钙化程度的密切关联。崔腾等人的研究显示, 斑块进展组的 CT-FFR 值显著低于非进展组, 并且 CT-FFR 与斑块进展呈负相关, 其与斑块定量参数及危险分层联合应用, 可显著提升对斑块进展风险的预测效能[20]。这表明 CT-FFR 能够反映斑块的动态变化。杨旭东等人的研究则探讨了冠状动脉钙化积分(CACS)与 CT-FFR 的相关性, 结果显示 CT-FFR 在不同钙化分组间存在显著差异, 是更高 CACS 组的危险因素[21]。

然而, 钙化斑块对 CT-FFR 的评估也提出了挑战。谢丽响等人的研究发现, 随着钙化积分的增加, CT-FFR 与冠状动脉造影(CAG)在诊断钙化斑块所致冠心病中的一致性和相关性均呈下降趋势[4]。这提示, 在严重钙化病变中, CT-FFR 的准确性可能受到“开花伪影”等因素的影响, 需要谨慎解读。此外, 钙化斑块和冠周脂肪同样与 CT-FFR 相关, 张冉等人的研究发现钙化积分、最狭窄程度以及冠周脂肪衰减指数(FAI)等指标均与 CT-FFR 呈负相关, 可以作为 CT-FFR 进展的标志因子[14] [22]。

2.3. CT-FFR 在主要不良心血管事件(MACE)预测中的价值

CT-FFR 的预后预测价值是当前研究的热点之一。多项研究证实, 较低的 CT-FFR 值是 MACE 发生的独立危险因素。孙诗敏等人的研究发现, CT-FFR 值降低是预测疑似冠心病患者 1 年后发生 MACE 的独立影响因素, 且其联合残余胆固醇(RC)可显著提高预测价值[8]。张佳佳和任克的研究也得出类似结论, 指出较低的 CT-FFR 是老年冠心病患者 MACE 的危险因素, 且 CT-FFR 联合冠脉狭窄程度对 MACE 的预测价值更高[9]。刘琪等人的研究则直接指出, CT-FFR 阳性患者的不良心血管事件发生率(38.7%)远高于 CT-FFR 阴性患者(3.8%) [23]。

尽管多数研究显示低 CT-FFR 值预示着更高的 MACE 风险, 但贺俊伟等人的研究发现了一个有趣的结论: 中重度钙化组的 CT-FFR 值高于轻度钙化组, 且 CT-FFR 指数越高, 这一结果可能是因为随着钙化斑块体积增大, 导致血管内径变窄, 血流受阻, 加重冠状动脉狭窄程度, 使得在充血状态下冠状动脉血流供应能力降低, 从而增高 CT-FFR 值[24]。这一看似矛盾的发现同时可能与钙化斑块的稳定性有关, 提示我们不能简单地将 CT-FFR 与 MACE 风险视为线性关系, 需要结合斑块特征进行综合分析。解福友等人的研究也证实, FAI、CT-FFR 是 MACE 发生的风险因素, 两者联合预测的效能优于单独预测[25]。

2.4. CT-FFR 技术的优化与拓展应用

为提升 CT-FFR 的评估效能, 研究者们也在不断探索技术优化。凡子榕等人的研究对比了基于机器学习方法测得的心室舒张期(dCTFFR)和收缩期(sCTFFR)CTFFR, 发现 dCTFFR 与有创 FFR 的相关性更好, 且在诊断心肌缺血的准确性上表现更优, 尤其是在“灰区”狭窄病变中, dCTFFR 的假阴性诊断率更低[26]。这提示选择合适的心动周期时相对于提高 CT-FFR 的诊断准确性至关重要。朱楠等人的研究则关注了基于第二代追踪冻结(SSF2)技术重建 CCTA 图像所测的跨狭窄 CT-FFR 差值(Δ CT-FFR), 发现 Δ CT-FFR 与冠状动脉疾病报告和数据系统(CAD-RADS)分类、心肌损伤指标均呈正相关[27]。这一发现为利用 Δ CT-FFR 评估跨狭窄压力梯度和心肌损伤提供了新的视角。

3. CCTA 在冠状动脉先天变异诊断中的价值与现状

冠状动脉先天变异虽然罕见，但其种类繁多，临床意义各异。CCTA 凭借其无创、三维成像的优势，已成为诊断和分型冠脉变异的核心影像学手段。

3.1. 起源异常的诊断与临床意义

冠脉起源异常是临床最常见的变异类型之一。张艳丽等人在一项纳入 7235 例 CCTA 的研究中发现，AOCA 的检出率为 1.2%，其中冠脉起源于异常冠状动脉窦是最常见的类型[28] [29]。吴启源等人的研究则重点分析了不同左冠状动脉开口对心肌运的影响，结果显示左冠状动脉高位开口与斑块形成、狭窄分布均无明显相关性，不会导致心肌缺血，是一种良性解剖变异[11]。然而，并非所有变异都是良性的。赵美华等人的研究发现，在单一冠状动脉畸形中，II 型(尤其是 LIIB 和 RIIB 亚型)患者更容易形成压迫性冠状动脉狭窄，进而出现心绞痛，提示这类患者需要早期干预[10]。杨晨光等人报道的右冠状动脉高位开口变异一例，尽管其临床意义尚不明确，但证实了此类变异的存在[30]。靳文剑的综述则强调了某些起源异常(如右冠状动脉开口于左冠窦)与青年人猝死的密切关系，凸显了早期明确诊断的重要性[30]。

3.2. 走行异常的诊断与临床意义

冠脉走行异常主要包括心肌桥、冠状动脉瘘等。彭薇等人的研究利用人工智能(AI)辅助分析冠状动脉 CTA 影像,发现 AI 与人工对冠脉变异与畸形的总检出率无显著差异,但 AI 在识别心肌桥等复杂畸形时,其检出数量(210 例)略低于人工(225 例) [3] [13]。这说明 AI 在冠脉变异诊断方面具有潜力,但针对复杂病例仍需人工复核和优化。汪芳等人的研究则聚焦于合并桥前斑块的心肌桥患者,发现通过基于机器学习的 CT-FFR 可以评估其血流动力学变化,且桥前 CT-FFR 值联合肌桥开口位置对桥前斑块的发生具有一定的预测价值[31]。这为评估心肌桥这类走行异常的生理学意义提供了新的思路。吴启源等人的研究分析了双左前降支变异的患病率和影像特征,发现其发病率为 0.14%,且短支前降支心肌桥比长支心肌桥更为多见[32]。

3.3. 罕见的冠脉终止异常

何泽兵等人的研究回顾性分析了 13 例先天性右冠状动脉缺如患者的 CCTA 表现,指出这是一种罕见变异,临床表现缺乏特异性,仅凭临床表现难以诊断,CCTA 联合选择性冠状动脉造影可确诊[13]。该研究还描述了此类患者左冠状动脉代偿性增粗、延伸并供应右心室区域的影像学特征,为临床识别这一罕见情况提供了参考。

4. 在先天变异患者中应用 CT-FFR 的挑战与价值探讨

当前,关于 CCTA 及 CT-FFR 在冠状动脉先天变异患者中应用的研究仍较为分散,主要集中在变异本身的形态学诊断上,而将 CT-FFR 应用于此领域的探索尚处于起步阶段。从现有文献来看,直接针对先天变异患者进行 CT-FFR 评估的研究相对匮乏。汪芳等人关于心肌桥患者的研究是为数不多的亮点,他们利用 CT-FFR 评估了心肌桥患者在不同心动周期(双期)的血流动力学变化,并发现桥前 FFRCT 值与肌桥开口位置对桥前斑块的发生有预测价值[31]。这为功能学评估在心肌桥这一特定变异中的应用提供了重要证据。然而,对于其他类型的变异,如起源异常、高位开口等,目前的研究多停留在形态学描述和临床意义的推断上。这说明 CT-FFR 在这些变异中的应用,主要被用于验证其“良性”或“恶性”的临床推论。

然而,将 CT-FFR 更深入地应用于冠脉先天变异评估,面临着独特的挑战。首先,先天变异常伴随

复杂的解剖结构，如异常开口、走行于主动脉和肺动脉之间等，这给基于 CCTA 图像的血流动力学建模带来了困难，可能影响 CT-FFR 计算的准确性[3] [28]。其次，如前所述，严重钙化斑块会影响 CT-FFR 的准确性[4]，而先天变异患者往往可能合并动脉粥样硬化，当两者共存时，如何区分缺血是由变异本身(如压迫性狭窄)还是由动脉粥样硬化性狭窄所导致，是一个亟待解决的问题。最后，目前对于先天变异患者，缺乏专门针对 CT-FFR 应用的大样本、前瞻性研究，其诊断阈值(如 0.8)是否同样适用于此类人群，尚需验证。

5. 未来研究方向与展望

基于当前研究的局限性与挑战，该领域未来的发展应聚焦于以下几个方向：第一，建立针对不同冠脉先天变异类型的 CT-FFR 特异性诊断标准。未来的研究需要开展多中心、大样本、前瞻性队列研究，系统性地评估各种变异的 CT-FFR 基线分布及预后界值。第二，开发能够自动识别并适应异常解剖结构的计算流体力学模型或深度学习算法，减少人工干预，提高 CT-FFR 在“非标准”冠脉解剖中的计算精度与可重复性。第三，利用 CT-FFR 联合斑块定量分析、冠周脂肪衰减指数等新型生物标志物，尝试量化并区分变异本身与获得性斑块各自对心肌缺血的独立贡献，建立整合解剖与功能的风险分层模型。第四，探索 CT-FFR 在先天变异患者中的长期预后价值。通过建立前瞻性随访登记系统，评估 CT-FFR 对这类患者远期发生主要不良心血管事件(MACE)的预测效能，从而为临床医生提供超越形态学诊断的、具有明确循证医学证据的治疗决策支持。

基金项目

山东省济宁市科技局 2024 年济宁重点研发计划项目(编号：2024YXNS061)。

参考文献

- [1] 周康锴, 应璇, 潘婷. CCTA 与 CT-FFR 诊断冠状动脉缺血病变的应用价值[J]. 中国现代医生, 2024, 62(22): 50-53+91.
- [2] 彭薇, 许永华, 杨利霞, 等. 人工智能在冠状动脉变异与畸形中的诊断价值[J]. 国际心血管病杂志, 2025, 52(4): 278-280.
- [3] 凡子榕, 王照谦. 冠状动脉 CT 血流储备分数在冠心病心肌缺血评估中的应用[J]. 实用放射学杂志, 2026, 42(2): 316-319.
- [4] 谢丽响, 鲍慧新, 胡春峰. CT-FFR 和冠状动脉造影在评价钙化斑块所致冠心病的相关性研究[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2025, 23(9): 63-65.
- [5] 田洋, 刘晓林. FFR、CT-FFR 及 QFR 在冠心病中的应用进展[J]. 中国医疗设备, 2025, 40(3): 164-168.
- [6] 唐阳阳. 基于 CCTA 的冠脉形态学参数联合 CT-FFR 及 FAI 预测冠脉狭窄患者心肌缺血的价值[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2025.
- [7] 高洁. 冠状动脉 CT-FFR 联合 FAI 在冠心病评估中的应用价值[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(1): 93-95+98.
- [8] 孙诗敏, 杨菲菲, 张春红, 等. 冠状动脉血流储备分数联合残余胆固醇预测主要不良心血管事件发生风险[J]. 心脏杂志, 2025, 37(4): 398-401+409.
- [9] 张佳佳, 任克. CT-FFR 对老年冠心病患者主要不良心脏事件的预测价值[J]. 心血管病防治知识, 2024, 14(16): 33-35+39.
- [10] 赵美华, 李荣先, 袁明远. 单一冠状动脉畸形的 CT 血管成像表现及临床意义[J]. 中国医刊, 2023, 58(5): 534-537.
- [11] 吴启源, 周华, 王伟, 等. 不同左冠状动脉开口对心肌运的影响[J]. 心脏杂志, 2021, 33(2): 182-185.
- [12] 吴启源, 陈琦, 赵志宏, 等. 右冠状动脉高位开口的 CT 血管成像表现及临床意义[J]. 中国医刊, 2023, 58(5): 572-574.
- [13] 何泽兵, 严高武, 李勇, 等. 冠状动脉 CT 血管造影对先天性右冠状动脉缺如的评价价值[J]. 分子影像学杂志, 2020, 43(4): 606-609.

- [14] 张冉, 李飞, 米玉霞, 等. 基于 CCTA 评估钙化斑块和冠周脂肪与 CT-FFR 的相关性[J]. 医学影像学杂志, 2025, 35(3): 39-42.
- [15] 郝艳, 杨景勇, 邓小飞, 等. FFR-CT 与冠脉斑块定量参数及临床特征的相关性研究[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2025, 23(2): 107-109.
- [16] 陈妍. 冠脉 CTA 及 CTFFR 成像联合血脂指标对心绞痛发作的预测价值[D]: [硕士学位论文]. 唐山: 华北理工大学, 2024.
- [17] 陈进, 孙维利, 钟艳云, 等. 基于人工智能的 CT-FFR 测量对诊断冠状动脉缺血性病变的应用价值[J]. 泰州职业技术学院学报, 2025, 25(4): 78-80+92.
- [18] 费锋, 万晓晓, 陈则君, 等. 斑块特征与基于 CT-FFR 诊断的心肌缺血的关系[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(18): 69-71.
- [19] 徐敏, 瞿华. 冠状动脉 CT 血管成像联合 CT-FFR 对冠心病心肌缺血影响因素的研究[J]. 中国现代医生, 2024, 62(25): 66-69.
- [20] 崔腾, 李琦, 王志伟, 等. 冠状动脉 CT 血管造影血流储备分数联合斑块定量分析及危险分层评估斑块进展的价值[J/OL]. CT 理论与应用研究: 1-7. <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2025.266>, 2026-04-27.
- [21] 杨旭东, 黄心怡, 石士奎. 基于人工智能测量的冠状动脉钙化积分与 CT-FFR 及斑块特征的相关性[J]. 分子影像学杂志, 2024, 47(8): 844-850.
- [22] 廖熙妍, 邹佳妮, 孙茹, 等. CCTA 斑块特征联合冠周脂肪衰减指数与 FFRCT 预测急性冠脉综合征的临床价值[J]. 放射学实践, 2024, 39(10): 1355-1360.
- [23] 刘琪, 竇勇, 王雅玲, 等. 冠状动脉 CT-FFR 值对冠心病患者不良心血管事件发生的影响[J]. 影像研究与医学应用, 2024, 8(14): 18-21.
- [24] 贺俊伟, 张绍金, 杨林, 等. 冠状动脉 CTA 与 CT-FFR 评估冠心病冠脉钙化程度并预测 MACE 价值研究[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2025, 23(8): 98-101.
- [25] 解福友, 刘艺超, 邱晓晖, 等. 基于人工智能的冠状动脉周围脂肪衰减指数联合 CT 血流储备分数预测冠心病患者不良心血管事件风险的价值[J]. 临床放射学杂志, 2024, 43(8): 1325-1331.
- [26] 凡子榕, 刘庆爽, 王照谦, 等. 基于机器学习方法心室舒张期和收缩期 CT 血流储备分数评估狭窄冠状动脉血流动力学[J]. 放射学实践, 2025, 40(4): 478-484.
- [27] 朱楠, 齐吴娟, 吴红艳, 等. 基于第二代追踪冻结技术重建冠状动脉 CT 造影图像所测冠状动脉跨狭窄 CT 血流储备分数差值与冠状动脉狭窄风险及心肌损伤指标的相关性[J]. 中国介入影像与治疗学, 2023, 20(8): 478-482.
- [28] 张艳丽, 刘勇, 何其舟, 等. CCTA 在冠脉起源异常诊断及评估解剖特征中的应用价值[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(11): 62-66.
- [29] 靳文剑. 冠状动脉 CT 血管造影在冠状动脉起源变异中的应用[J]. 中国药物与临床, 2019, 19(7): 1144-1145.
- [30] 杨晨光, 杨学灏, 马亚磊, 等. 右冠状动脉高位开口变异一例[J]. 解剖学杂志, 2024, 47(4): 280.
- [31] 汪芳, 唐路松, 杨利莉, 等. 基于 FFRCT 评估合并桥前斑块心肌桥患者血流动力学变化相关性研究[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2025, 31(4): 491-498.
- [32] 吴启源, 贾雷, 庞茂华, 等. CTA 诊断双左前降支变异的患病率和影像特征[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2025, 23(3): 87-89.