

# 双源CT双能量减影技术在评估严重钙化冠状动脉狭窄程度的应用研究

李正腾, 王 敏, 潘冬梅, 王宪凯

济宁市第一人民医院放射科, 山东 济宁

收稿日期: 2025年12月28日; 录用日期: 2026年1月21日; 发布日期: 2026年1月30日

## 摘要

目的: 研究双能CT减影技术在重度冠脉钙化患者斑块狭窄程度判断方面的价值。方法: 选取2022年4月到2023年9月在济宁市第一人民医院就诊, 临床疑诊或确诊冠心病受检者53例。所有受检者均行双能量CCTA检查(DECTA), 于60天内行导管法冠状动脉血管造影(CAG)检查, 且钙化积分  $> 400$ 。根据重建方法的不同分为标准重建组、双能量重建组。结果: 以CAG诊断为重度狭窄及闭塞为标准, 标准重建组的诊断准确率和特异度为86.9% (53/61)、54.8% (40/73), 双能量减影组为82% (50/61)、93.2% (68/73)。双能量减影组与CAG对冠状动脉检出的狭窄结果有较好的一致性和相关性。结论: 双能减影CTA技术在重度冠脉钙化患者斑块狭窄程度判断方面具有较好的临床应用价值。

## 关键词

冠状动脉CT血管造影, 冠心病, 冠状动脉钙化

# Research on the Application of Dual-Source CT Dual-Energy Subtraction Technology in Evaluating the Degree of Severe Calcified Coronary Artery Stenosis

Zhengteng Li, Min Wang, Dongmei Pan, Xiankai Wang

Department of Radiology, Jining No. 1 People's Hospital, Jining Shandong

Received: December 28, 2025; accepted: January 21, 2026; published: January 30, 2026

文章引用: 李正腾, 王敏, 潘冬梅, 王宪凯. 双源CT双能量减影技术在评估严重钙化冠状动脉狭窄程度的应用研究[J]. 医学诊断, 2026, 16(1): 41-46. DOI: 10.12677/MD.2026.161007

## Abstract

**Objective:** To investigate the value of dual-energy CT subtraction technology in assessing the degree of stenosis caused by calcified plaques in patients with severe coronary artery calcification. **Methods:** A total of 53 subjects clinically suspected or diagnosed with coronary heart disease at Jining No. 1 People's Hospital between April 2022 and September 2023 were selected. All subjects underwent dual-energy CCTA (DECTA) and catheter-based coronary angiography (CAG) within 60 days, with a calcium score  $> 400$ . Based on the reconstruction method, they were divided into a standard reconstruction group and a dual-energy reconstruction group. **Results:** Using CAG diagnosis of severe stenosis and occlusion as the standard, the accuracy and specificity of the standard reconstruction group were 86.9% (53/61) and 54.8% (40/73), respectively, while those of the dual-energy subtraction group were 82% (50/61) and 93.2% (68/73). The dual-energy subtraction group showed relatively good consistency and a high correlation with CAG in detecting coronary artery stenosis. **Conclusion:** Dual-energy subtraction CTA technology holds significant clinical value in evaluating the degree of plaque stenosis in patients with severe coronary artery calcification.

## Keywords

Coronary CT Angiography, Coronary Heart Disease, Coronary Artery Calcification

---

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

冠状动脉计算机断层血管造影(Coronary Computed Tomography Angiography, CCTA)相较于有创的冠状动脉造影(Coronary Artery Angiography, CAG)具有创伤小、检查时间短的优势[1]。近些年，随着技术的发展，CCTA 对冠状动脉狭窄的阴性预测值很高，还可检测斑块的定量和定性特征，预测未来心血管事件的风险，已成为临床诊断 CAD 的首选无创检查[2]。然而，冠状动脉钙化(Coronary Artery Calcification, CAC)的晕染效应和光束硬化伪影会影响诊断准确性，由于钙化斑块及金属支架产生的硬化伪影，对评估冠状动脉管腔狭窄程度造成了干扰，导致狭窄程度被过分评估或无法评估[3]。双能量 CT 目前已广泛应用于临床，采用多能谱(双能/多能)成像技术能更精准地实现物质分离(如钙、碘、尿酸)，提升了分析斑块成分、定量心肌灌注及虚拟去钙化能力等[4]。

本文拟通过冠状动脉双能量扫描及后处理去除钙化斑块，CT 双能减影技术与常规冠状动脉 CTA 重建结果并对比冠状动脉造影(CAG)，探讨双能减影 CTA 技术评估重度冠脉钙化患者斑块狭窄程度的应用价值。

## 2. 临床资料

选取 2022 年 4 月到 2023 年 9 月济宁市第一人民医院临床疑诊或确诊冠心病受检者。所有受检者均行双能量 CCTA 检查(Dual-Energy Coronary Computed Tomography Angiography, DE-CCTA)，且 60 天内行导管法冠状动脉血管造影(CAG)检查的患者 53 例。其中男性 42 例，女性 11 例，年龄 40~84 岁。参照美国心脏病学会基金会及美国心脏协会《冠状动脉钙化积分危险分级指南》[5]，纳入研究的冠状动脉钙化斑块要符合钙化积分  $> 400$ ，钙化积分为重度。本研究经济宁市第一人民医院伦理委员会批准(审批号：

KYLL202308-127)。

排除标准: ① CT 图像质量不佳。② 合并其他严重的心血管病变如: 主动脉夹层、先天性心脏病等; ③ 冠状动脉支架置入者。

### 3. 检查方法

#### (一) 双能量 CCTA 检查

采用德国西门子 Somation Definition Flash CT 机, 受检者采用仰卧位, 检查前口服美托洛尔控制心率(60~80 bpm/s), 进行充分的呼吸训练。扫描起自气管隆突下至心脏膈面水平。

冠脉 CTA 扫描序列应用双能模式, 扫描参数设定为: 管电压分别为 100 kV、Sn150 kV, 自动管电流, 回顾性心电门控, 重建最佳舒张期及收缩期图像。对比剂流速为 4.5~5.5 ml/s, 高压注射器经肘静脉依次注入 50~70 ml 的对比剂碘海醇(350 mgI/ml)及 40 ml 生理盐水。采用对比剂示踪法自动触发扫描(CT 值 > 100 HU)。扫描范围为气管隆突下至心脏膈面。根据重建方法的不同分为 A、B 两组, A 组选用最佳期相融合图像, B 组将双能数据一同调入双能软件(Dual Energy)中, 得到双能减影图像(去骨、去钙化), 管腔值直径计算狭窄程度。参照美国心脏病学会建议的冠状动脉树 18 段分段法[6]进行冠状动脉节段分段, 仅评估 LAD、LCX 及 RCA 直径  $\geq 1.5$  mm、管壁钙化伴管腔狭窄的冠状动脉节段。CTA 图像由两名工作 8 年以上的影像诊断医师独立诊断获得, 二者意见不统一时, 由二者协同进行再次评估直至达成一致。

#### (二) 冠状动脉造影(Coronaryangiography, CAG)仪器

采用 GE Innova 3100-1Q 血管造影机, 以 Seldinger 技术经患者右股动脉或桡动脉开展穿刺置管操作, 遵循不同体位多角度原则采集图像, 对充盈效果较好的图像进行分析。结果由两位经验丰富的心内科专家独立诊断获得, 意见不同时通过协商取得一致。

#### (三) 图像质量评分

图像质量采用 Likert 评分法: 0 分, 图像质量差, 管壁被过度去除, 伪影较为严重, 无法诊断; 1 分, 较差, 管壁显示欠佳, 局部伪影, 较难诊断; 2 分, 良, 管壁显示较好, 个别层面出现伪影, 大部分层面满足诊断要求; 3 分, 优, 管壁连续, 无伪影; 2 分以下的病例不纳入统计范围。

#### (四) 统计学分析

应用 SPSS 25.0 统计学软件进行统计分析。计数资料以例数(%)表示。采用 Kappa 检验评价两实验组和 CAG 结果的一致性, 其中分为一致性高(0.75~1.00)、较好(0.60~0.74)、中等(0.40~0.59)、差(<0.40)。采用 Pearson 检验评价两种后处理技术与 CAG 评价冠状动脉狭窄的相关性。评估两组重建方法对冠脉钙化斑块导致管腔狭窄程度的诊断效能。 $P < 0.05$  为差异具有统计学分析意义。

#### 结果

53 例患者的 159 支冠状动脉, 通过双能量减影去骨技术重建处理后, 右冠状动脉图像满足诊断率为 94.3%, 前降支图像满足诊断率为 90.6%, 回旋支图像满足诊断率为 92.4%, 由此可见 RCA 图像满足诊断率最高, LAD、LCX 满足诊断率略低, 所得冠状动脉图像整体满足诊断率为 92.5%, 见表 1。

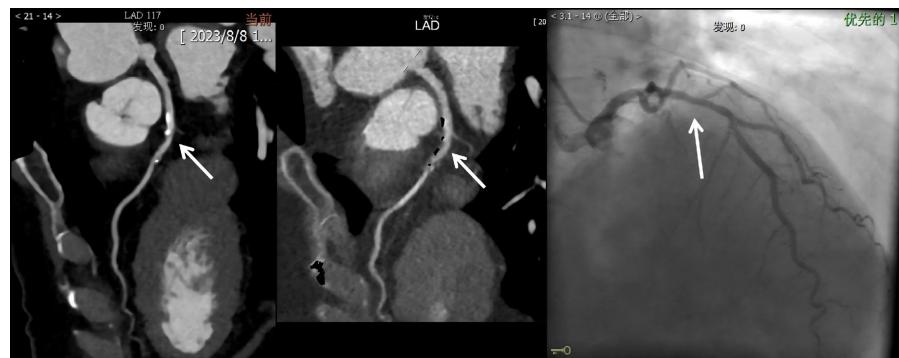
根据以上结果, 53 例患者 159 支血管中共检出满足双能量 CTA 诊断要求的冠状动脉 147 支, 其中 1 支 CAG 未进入, 12 支 CTA 和 CGA 均未检测到斑块及狭窄, 最终共计 134 支入组进行分析。CAG 诊断轻微狭窄 4 段、轻度狭窄 37 段、中度狭窄 32 段、重度狭窄 53 段及闭塞 8 段; 标准后处理诊断轻微狭窄 1 段、轻度狭窄 12 段、中度狭窄 35 段、重度狭窄 72 段及闭塞 14 段, 双能量减影去骨后处理诊断轻微狭窄 8 段、轻度狭窄 30 段、中度狭窄 39 段、重度狭窄 55 段及闭塞 2 段, 见图 1。其中以 CAG 诊断为重度狭窄及闭塞为标准, 标准重建组诊断灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值分别为 86.9%(53/61)、

54.8% (40/73)、61.6% (53/86)、68.8% (33/48)，ROC 曲线下面积为 0.708 (95% CI: 0.62~0.797)，双能量减影组灵敏度、特异度、阳性预测值、阴性预测值分别为 82% (50/61)、93.2% (68/73)、90.9% (50/55)、86.1% (68/79)，ROC 曲线下面积为 0.876 (95% CI: 0.809~0.942)，见图 2。标准重建组与 CGA 对冠状动脉狭窄检出结果的  $\text{Kappa} = 0.204$  ( $P < 0.001$ )，提示一致性差；双能量减影组与 CGA 结果的一致性较好， $\text{Kappa} = 0.63$  ( $P < 0.001$ )。减影去骨后处理重建图像与 CAG 间相关性较高( $r^2 = 0.763$ ,  $P < 0.01$ )，标准后处理重建图像与 CAG 间相关性显著低于前者( $r^2 = 0.429$ ,  $P < 0.01$ )。

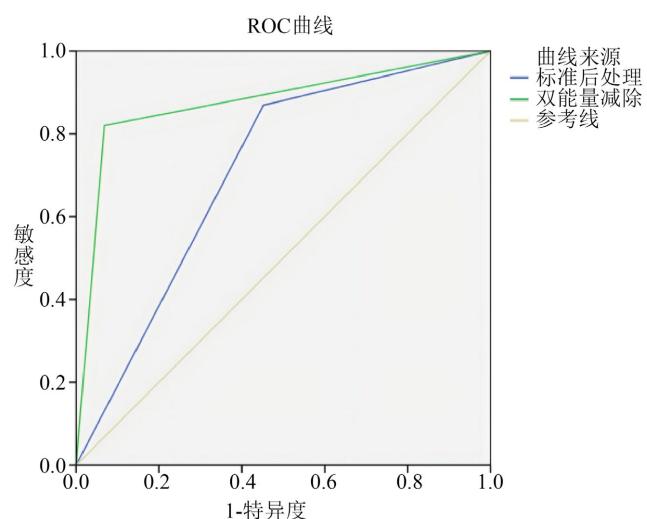
**Table 1.** Diagnostic adequacy rate of CT dual-energy subtraction images

**表 1.** CT 双能量减影图像满足诊断率

分段	评分				合计	图像满足诊断率(%)
	3	2	1	0		
RCA	22	28	1	2	53	94.3
LAD	29	19	3	2	53	90.6
LCX	27	22	2	2	53	92.4
合计	78	69	6	6	159	92.5



**Figure 1.** Images from standard post-processing CCTA, dual-energy subtraction CCTA, and coronary artery angiography  
**图 1.** 标准后处理 CCTA、双能量减影 CCTA 及冠状动脉造影图像



**Figure 2.** ROC curve analysis for predicting severe stenosis and occlusion in the standard reconstruction group and the dual-energy subtraction group

**图 2.** 标准重建组和双能量减影组在预测重度狭窄及闭塞的 ROC 曲线分析

## 4. 讨论

近年来, 多种双能量 CT 扫描仪相继问世。双能量 CT 成像技术利用不同物质在不同能量下 X 线的物质衰减系数不同, 实现不同物质的相互分离, 将钙从血管壁中去除, 而碘对比剂保持不变, 更准确地量化狭窄[3] [7] [8]。减影冠状动脉 CT 血管成像技术具有图像质量高、可消除线束硬化伪影的干扰等优点, 通过去除钙化斑块和金属支架, 对血管腔的显示更佳, 显著提高冠脉成像的图像质量及诊断的准确性[9]。

本次采用减影技术得到去除钙化斑块的减影图像, 全部 159 支血管的图像质量总满意率为 92.5%, 可以满足日常工作需求。本研究发现, 在冠状动脉不同分支中, 右冠状动脉(RCA)的图像满足诊断率最高(94.3%), 而前降支(LAD)和回旋支(LCX)的满足诊断率略低, 与相关研究结果类似[3]。既往研究显示, 随着病变部位向远端延伸, 错位发生率呈现上升趋势[10]。右冠状动脉沿房室沟走行的解剖结构, 导致其运动位移幅度较大, 加之房室运动不同步产生的运动伪影, 可能是右冠状动脉错位发生率较高的原因[11]。此外, 部分冠状动脉在不同 R-R 间期阶段仍能清晰显示(右冠状动脉 40%; 左回旋支 50%; 左前降支 60%~70%)。本研究中, 重建时主要选取了 75% 的 R-R 间期作为相位基准, 该参数对左前降支更为适用[12]。未来需开展更多研究以减少重建伪影, 提高双能量减影技术的成功率。

相关文献报道, 标准重建 CTA 诊断为严重钙化斑块中, 约有 38.7%~50% 的节段被判定为无诊断意义[10], 通过减影技术, 消除造影剂增强以外的高密度区域以及相关伪影, 将会使评估管腔变得更容易[13]。本研究中证实, 双能量减影组对于重度及闭塞病变的诊断准确率和特异度分别为 82%、93.2%, 其特异性显著优于标准组, 结果显示标准重建存在较严重的假阳性问题, 即容易将轻、中度的狭窄过度诊断为重度狭窄或闭塞, 而这一情况通过双能量重建得到较好的解决。如图 1 所示, 74 岁的女性患者, 在标准后处理 CCTA 显示 LAD 近段中度狭窄, 双能量减影 CCTA 显示管腔轻微狭窄, 与 CAG 结果一致。本研究结果中诊断一致性和相关性显示, 双能量减影组均优于标准重建组, 表明冠状动脉双能量减影技术在诊断管腔狭窄方面有较好的应用价值, 有助于提高医师的诊断信心。

综上, 本研究证实, 冠状动脉 CT 双能减影技术可以在一定程度上解决严重冠状动脉钙化患者因钙化斑块导致狭窄评估不准确的问题, 对冠心病的精准诊疗具有较好的应用价值。

## 基金项目

2023 年济宁市重点研发计划项目(双源 CT 双能量减影技术在评估严重钙化冠状动脉狭窄程度的应用研究(编号: 2023YXNS074))。

## 参考文献

- [1] 宣拓, 魏来, 董慧玲. CCTA 与 DSA 在诊断冠状动脉斑块的临床应用价值[J]. 中国临床医学影像杂志, 2024, 35(5): 325-328.
- [2] 中华医学会放射学分会心胸学组, 中国医师协会放射医师分会心血管学组, 中国食品药品检定研究院. 冠状动脉 CT 血管成像数据标注和质量控制专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2024, 58(1): 25-33.
- [3] 孟雪, 许楠, 席芊. 双能量 CT 和 320 排 CT 冠状动脉减影技术的临床应用[J]. 心血管病学进展, 2020, 41(5): 504-507+512.
- [4] 吕滨, 徐磊, 王锡明, 等. 技术创新与临床实践驱动心血管 CT 和 MRI 高质量发展[J]. 中国医学影像技术, 2025, 41(8): 1223-1228.
- [5] Mantini, C., Maffei, E., Toia, P., Ricci, F., Seitun, S., Clemente, A., et al. (2018) Influence of Image Reconstruction Parameters on Cardiovascular Risk Reclassification by Computed Tomography Coronary Artery Calcium Score. *European Journal of Radiology*, 101, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2018.01.005>
- [6] 刘春雨, 谢媛, 苏晓芹, 等. 基于人工智能的冠状动脉 CT 血管成像检测阻塞性冠状动脉狭窄效能的研究[J]. 国

- 际医学放射学杂志, 2021, 44(5): 516-522.
- [7] 张龙江, 郭翔. 心血管 CT: 进展和展望[J]. 国际医学放射学杂志, 2023, 46(3): 249-254.
- [8] Ohta, Y., Kitao, S., Watanabe, T., Kishimoto, J., Yamamoto, K. and Ogawa, T. (2017) Evaluation of Image Quality of Coronary Artery Plaque with Rapid KVP-Switching Dual-Energy CT. *Clinical Imaging*, **43**, 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2017.01.014>
- [9] 过伟锋, 曾蒙苏, 钱菊英, 等. 冠脉严重钙化节段 CT 减影血管成像技术的临床应用[J]. 复旦学报(医学版), 2017, 44(3): 274-279.
- [10] Fuchs, A., Kühl, J.T., Chen, M.Y., Viladés Medel, D., Alomar, X., Shanbhag, S.M., et al. (2018) Subtraction CT Angiography Improves Evaluation of Significant Coronary Artery Disease in Patients with Severe Calcifications or Stents—The C-Sub 320 Multicenter Trial. *European Radiology*, **28**, 4077-4085. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5418-y>
- [11] Viladés Medel, D., Leta, R., Alomar Serralach, X., Carreras Costa, F. and Pons-Lladó, G. (2015) Reliability of a New Method for Coronary Artery Calcium or Metal Subtraction by 320-Row Cardiac CT. *European Radiology*, **26**, 3208-3214. <https://doi.org/10.1007/s00330-015-4130-4>
- [12] Kalisz, K., Buethe, J., Saboo, S.S., Abbbara, S., Halliburton, S. and Rajiah, P. (2016) Artifacts at Cardiac CT: Physics and Solutions. *RadioGraphics*, **36**, 2064-2083. <https://doi.org/10.1148/rg.2016160079>
- [13] 周艳, 贺毅, 李芳, 等. 双屏气减影冠状动脉 CTA 成像技术在冠脉支架内再狭窄中的诊断价值[J]. CT 理论与应用研究(中英文), 2025, 34(4): 660-666.