

冠状动脉钙化积分在冠心病临床价值中的研究进展

付丹阳¹, 杜敏^{2*}

¹济宁医学院医学影像与检验学院, 山东 济宁

²济宁医学院附属医院医学影像科, 山东 济宁

收稿日期: 2026年3月28日; 录用日期: 2026年4月22日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

冠状动脉钙化积分(Coronary Artery Calcium Score, CACS)作为反映冠状动脉粥样硬化负荷的重要影像学标志物, 在冠心病的早期识别、风险分层及预后评估中具有重要临床价值。本文系统梳理了CACS在冠心病临床价值方面的研究进展。技术层面, 传统心电门控CT存在辐射剂量高、需专门扫描等局限, 而非门控CT联合人工智能的应用使CACS可融入常规胸部CT筛查, 显著提升了检查效率, 但不同重建时相及算法的影响仍需标准化。本文评述了不同AI算法在钙化分割中的性能差异, 并指出了当前研究在设计上的常见局限。机制层面, CACS不仅与传统危险因素(年龄、血脂、血糖等)显著正相关, 还与炎症因子(hs-CRP、IL-6等)水平中度相关, 揭示了钙化负荷与炎症状态的内在联系。预后层面, CACS是主要不良心血管事件的独立预测因子, 但其预测价值在不同人群中呈现差异化特征: 无症状老年人中CACS分级与风险密切相关; 而青年患者中传统危险因素作用更为突出。本文新增了CACS临床应用的争议讨论。尽管研究取得显著进展, 但仍存在方法学标准不统一、钙化形态与分布关注不足、特殊人群分层模型缺乏大规模验证等局限。未来研究需在标准化测量基础上, 结合钙化形态学特征与多维度生物标志物, 构建精细化风险预测模型, 并加强特殊人群的前瞻性多中心验证。

关键词

冠心病, 冠状动脉钙化积分, 心血管事件, 人工智能

Research Progress on the Clinical Value of Coronary Artery Calcium Score in Coronary Heart Disease

Danyang Fu¹, Min Du^{2*}

¹College of Medical Imaging and Laboratory, Jining Medical University, Jining Shandong

*通讯作者。

Abstract

As an important imaging biomarker reflecting the burden of coronary atherosclerosis, the Coronary Artery Calcium Score (CACs) holds significant clinical value in the early identification, risk stratification, and prognosis assessment of coronary heart disease. This article systematically reviews the research progress on the clinical value of CACS in coronary heart disease. At the technical level, traditional electrocardiogram-gated CT has limitations such as high radiation dose and the need for dedicated scanning, whereas the application of non-gated CT combined with artificial intelligence enables the integration of CACS into routine chest CT screening, significantly improving examination efficiency; however, the impact of different reconstruction phases and algorithms requires standardization. This review evaluates the performance differences of various AI algorithms in calcium segmentation and identifies common design limitations in current studies. At the mechanistic level, CACS not only shows a significant positive correlation with traditional risk factors (such as age, blood lipids, and blood glucose) but also demonstrates a moderate correlation with inflammatory markers (such as hs-CRP and IL-6), revealing the intrinsic relationship between calcification burden and inflammatory status. Regarding prognostic prediction, CACS is an independent predictor of major adverse cardiovascular events, yet its predictive value exhibits differential characteristics across populations: in asymptomatic older adults, CACS grading is closely associated with risk, whereas in young patients, traditional risk factors play a more prominent role. This article additionally discusses controversies in the clinical application of CACS. Despite significant progress, limitations remain, including a lack of standardized methodological approaches, insufficient attention to calcification morphology and distribution, and the absence of large-scale validation of risk stratification models in special populations. Future research should focus on standardized measurement, integrate calcification morphological features with multidimensional biomarkers to construct refined risk prediction models, and strengthen prospective, multicenter validation in special populations.

Keywords

Coronary Heart Disease, Coronary Artery Calcium Score, Cardiovascular Events, Artificial Intelligence

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(Coronary Heart Disease, CHD)是严重威胁人类健康的心血管疾病,其发病率在全球范围内持续攀升,并呈现年轻化趋势。冠心病的临床进展隐匿,而终末期事件如急性心肌梗死往往突发且后果严重,因此,早期识别、精准诊断和有效风险分层对于疾病的防控至关重要。CACs作为反映冠状动脉粥样硬化整体负荷的特异性生物标志物,已被证实与冠心病的存在、严重程度及未来主要不良心血管事件(Major Adverse Cardiovascular Events, MACE)风险密切相关[1][2]。随着影像技术的进步,尤其是人工智

能(Artificial Intelligence, AI)的引入, CACS 的获取方式、诊断效能及应用场景正在经历深刻变革, 其在临床决策中的价值也日益凸显。本研究旨在系统梳理冠状动脉钙化积分在冠心病临床价值方面的研究进展。

2. 基于人工智能与非门控 CT 的 CACS 评估技术进展

传统上, CACS 的评估依赖于心电门控的 CT 扫描, 以确保图像质量并减少心脏搏动伪影, 但其辐射剂量相对较高, 且需要专门扫描, 限制了其在大规模人群筛查中的应用。近年来, 利用非门控胸部 CT 平扫数据计算 CACS 成为研究热点, 因其可在一次常规胸部 CT 中同时获取心血管风险评估信息, 显著提升了检查效率并降低了额外辐射暴露[3]。

多项研究评估了非门控胸部 CT 平扫 CACS 的准确性与可行性。顾海峰等人的研究指出, 虽然非门控胸部 CT 平扫与心电门控 CACS 扫描在图像质量参数上存在显著差异, 且非门控 CT 评估的风险分层存在被低估的倾向, 但作为一种额外的诊断信息, 其对临床仍具有积极的指导意义[4]。陈颖等人的研究证明, 基于人工智能(AI)的非门控 CACS 在不同心血管病危险因素人群(如不同高血压分级、血脂异常状态)中均表现出可靠且稳定的风险分层能力[5]。然而, 技术上的细微差异仍需谨慎对待。汤化民等人的研究发现, 心脏 CT 不同的重建时相会对 CACS 危险分级产生影响, 尤其是在平均 CACS 较低的患者中, 存在分级跨级的风险[6]。这提示我们, 即使是心电门控 CT, 不同时相的重建也可能导致结果重复性不佳, 强调了标准化操作流程的重要性。

在 AI 算法层面, 当前主流方法包括卷积神经网络(CNN)和 U-Net 等深度学习架构。研究显示, 基于深度学习的 AI 算法在心电门控 CT 的 CACS 评估中与人工评分具有极佳的一致性, 在非门控胸部 CT 中亦表现出良好相关性[7]。然而, AI 在非门控 CT 上仍存在一定的风险误分类率, 主要表现为高估或低估风险等级, 右冠状动脉区域的钙化评分可靠性相对较低。此外, 心率偏快患者的 CACS 易被低估, 提示算法在运动伪影校正方面仍有优化空间。

3. CACS 与冠心病危险因素、病理生理及功能学评估的关联研究

CACS 不仅仅是一个解剖学指标, 其背后蕴含着复杂的病理生理学信息, 并与传统心血管病危险因素及冠脉功能学状态密切相关。首先, CACS 与冠心病危险因素存在显著关联。多项研究证实, 年龄、性别、吸烟史、血糖、血脂(尤其是甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇)等传统危险因素与 CACS 呈正相关[8]。此外, CACS 与动脉粥样硬化性心血管疾病(ASCVD)的风险分层也紧密相关。张卓然等人的研究表明, ASCVD 风险等级更高的人群, 其 CACS 值和 MACE 发生率均显著升高, 严重冠状动脉钙化(CACS \geq 100)是 ASCVD 一级预防人群发生 MACE 的独立危险因素, 这为基于 CACS 进行精准预防提供了依据[9]。

其次, CACS 与炎症因子的相互作用日益受到关注。动脉粥样硬化被认为是一种炎症性疾病, 而钙化则是其晚期表现。朱栖铭的研究发现, 冠心病患者的 CACS 与血清高敏 C 反应蛋白(hs-CRP)、白介素-6(IL-6)及肿瘤坏死因子- α (TNF- α)等炎症因子水平呈中度正相关, 且 CACS 和 hs-CRP 均为 MACE 发生的独立预测因子[1]。研究揭示了 CACS 不仅代表了钙化的“量”, 也间接反映了潜在的炎症“质”, 两者结合能更全面地评估患者的风险状态。值得注意的是, CACS 对临床决策的指导价值已获指南认可。2018 年 ACC/AHA 血脂管理指南建议, 在临界至中危风险且他汀治疗决策不明确的无症状人群中, 可考虑使用 CACS 进行风险分层[10]。

4. CACS 对冠心病预后的预测价值及其在不同人群中的应用

CACS 最核心的临床价值在于其对未来心血管事件的预测能力。大量研究表明, CACS 是 MACE 的独立预测因子。刘佳丽等人的研究发现, 在无症状老年人中, CACS 分级与 MACE 风险密切相关, 且

CACS 的预测价值在不同特征的人群中存在差异, 对于睡眠质量不佳的老年人, 即使轻中度的冠脉钙化也预示着更高的风险[11]。谢佩珊的研究则关注了青年冠心病患者, 发现在年龄 ≤ 45 岁的年轻 CAD 组中, CACS 对严重冠脉狭窄的预测无统计学意义, 而吸烟、肥胖、低 HDL 等传统危险因素则占据主导地位[11]。这警示我们, 对于青年人群, CACS 的应用需结合其特殊的风险谱系进行解读。国际大型前瞻性队列研究(如 MESA、Rotterdam Study、Heinz Nixdorf Recall 等)一致证实, 在传统风险模型基础上加入 CACS 可显著改善风险重分类[12]。

5. CACS 临床应用的争议与挑战

尽管 CACS 在心血管风险分层中价值显著, 但其临床应用仍存在若干争议与挑战。首先, CACS 仅能检测已钙化的动脉粥样硬化斑块, 无法识别非钙化或混合性斑块。这对于年轻患者尤为重要, 因其动脉粥样硬化常以非钙化斑块为主, 可能导致 CACS 为 0 但存在易损斑块的情况, 从而低估真实风险。研究表明, 在 CACS = 0 的无症状中高危个体中, 冠状动脉 CTA 仍可检出 72.2% 的非钙化斑块, 提示单独依赖 CACS 可能遗漏重要的亚临床动脉粥样硬化[13]。其次, CACS 测量涉及辐射暴露, 尽管现代 CT 扫描辐射剂量已降至 0.5~1.5 mSv, 但用于无症状人群筛查时, 辐射累积风险仍需权衡获益。成本效益方面, Pletcher 等的研究显示, CACS 筛查在中危患者中具有成本效益的前提是他汀药物成本较高或显著影响生活质量, 而在他汀成本较低时, “全员治疗”策略可能优于 CACS 筛查[14]。此外, 方法学标准化问题亦值得关注: 不同 CT 重建时相可导致 CACS 评分出现一定程度的变异, 不同 AI 算法和心率条件下 CACS 结果也存在差异, 这可能影响风险分级的稳定性和跨研究比较。最后, 目前 CACS 指导治疗的获益主要来自观察性研究, 尚缺乏大型随机对照试验证实基于 CACS 的治疗策略优于传统风险模型。

6. 总结

冠状动脉钙化积分(CACS)作为重要的影像学生物标志物, 在冠心病临床管理中角色日益凸显。当前研究呈现技术从心电门控向非门控及人工智能辅助跨越、临床从形态学向多维度机制探索延伸、预后预测向个体化风险分层发展、多指标联合模型借助人工智能构建等趋势。尽管 CACS 已被纳入 ACC/AHA 临床指南用于中危人群风险分层, 但仍存在研究方法学标准不统一、机制理解不深、钙化形态分布关注不足、特殊人群分层模型缺乏大规模验证等局限。基于此, 本研究拟采用标准化 AI 辅助非门控 CT 测量, 结合 CACS 量化数值与钙化形态学特征构建精细预测模型, 并聚焦无症状中年人群, 系统整合多维度生物标志物评估远期预后, 以期为个体化防治提供循证依据。

基金项目

济宁市科技局重点研发计划(2024YXNS016)。

参考文献

- [1] 朱栖铭. 冠状动脉 CTA 钙化积分与冠心病患者血清炎症因子及主要心血管事件的关系研究[J]. 影像研究与医学应用, 2026, 10(3): 71-73.
- [2] 李奕霖, 薛源, 王世攀, 白碧琛, 李昊锡, 李海洋. 冠状动脉钙化在冠心病诊治中作用的研究进展: 传统模型和机器学习模型[J]. 心肺血管病杂志, 2026, 45(1): 108-113.
- [3] 刘辰月, 吕滨. 冠状动脉钙化积分与 CCTA 在疑诊冠心病患者早期临床管理中的应用与研究进展[J]. 放射学实践, 2026, 41(1): 102-106.
- [4] 顾海峰, 王清清, 梁泉, 蔡军, 张龙江. 利用非门控胸部 CT 平扫数据行冠状动脉钙化积分评价的可行性分析[J]. 医学影像学杂志, 2024, 34(7): 22-26.
- [5] 陈颖, 马莹莹, 李承霖, 崔露露, 郭力琼, 秦江彦, 李延静. 基于人工智能非门控钙化积分不同人群风险分层的

- 效能研究[J]. 临床放射学杂志, 2025, 44(11): 2071-2077.
- [6] 汤化民, 苟杰, 林伟, 银文杰, 杨帆, 张波莉, 贺倩. 心脏 CT 重建时相对冠状动脉钙化积分危险分级的影响[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(1): 50-53.
- [7] Wang, T.W., Tzeng, Y.H., Wu, K.T., Liu, H.R., *et al.* (2024) Meta-Analysis of Deep Learning Approaches for Automated Coronary Artery Calcium Scoring: Performance and Clinical Utility AI in CAC Scoring: A Meta-Analysis: AI in CAC Scoring: A Meta-Analysis. *Computers in Biology and Medicine*, **183**, Article 109295. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.109295>
- [8] 王佩, 胡晓恒, 王晓娜, 刘洋. 冠状动脉钙化积分与冠心病危险因素的相关性分析[J]. 中国老年保健医学, 2023, 21(1): 68-71.
- [9] 张卓然. 冠状动脉钙化积分对动脉粥样硬化性心血管疾病不同风险等级人群主要不良心脑血管事件的预后价值[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2024.
- [10] Grundy, S.M., Stone, N.J., Bailey, A.L., Beam, C., Birtcher, K.K., Blumenthal, R.S., *et al.* (2019) 2018 AHA/ACC/AACVPR/AAPA/ABC/ACPM/ADA/AGS/APHA/ASPC/NLA/PCNA Guideline on the Management of Blood Cholesterol: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines. *Circulation*, **139**, e1082-e1143. <https://doi.org/10.1161/cir.0000000000000625>
- [11] 刘佳丽. 睡眠特征及冠状动脉钙化积分对无症状老年人群不良心血管事件的风险预测研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 中国人民解放军空军军医大学, 2025.
- [12] Pavlović, J., Bos, D., Ikram, M.K., Ikram, M.A., Kavousi, M. and Leening, M.J.G. (2025) Guideline-Directed Application of Coronary Artery Calcium Scores for Primary Prevention of Atherosclerotic Cardiovascular Disease. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **18**, 465-475. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2024.12.008>
- [13] Ashraf, F., Qureshi, M.R., Alam, M., Umroa, S., Husain, S., Amin, F.U., *et al.* (2025) Preliminary Observations on Discordance between Coronary Artery Calcium Score of Zero and Coronary Computed Tomography Angiography Findings in Asymptomatic Adults. *Cardiology Research*, **16**, 518-524. <https://doi.org/10.14740/cr2151>
- [14] Pletcher, M.J., Pignone, M., Earnshaw, S., McDade, C., Phillips, K.A., Auer, R., *et al.* (2014) Using the Coronary Artery Calcium Score to Guide Statin Therapy: A Cost-Effectiveness Analysis. *Circulation: Cardiovascular Quality and Outcomes*, **7**, 276-284. <https://doi.org/10.1161/circoutcomes.113.000799>