

## ◁ 影像技术学 ▷

## 基于人工智能的冠状动脉钙化积分算法在胸部 CT 中的应用价值及影响因素分析

高峻峰, 张倩, 徐杭, 马跃, 侯阳  
(中国医科大学附属盛京医院放射科, 辽宁 沈阳 110004)

**[摘要]** 目的:探讨人工智能(AI)软件在胸部平扫 CT 的冠状动脉钙化积分(CACS)测量中的应用价值及其影响因素。方法:回顾性纳入 237 例在 1 月内行心电图门控心脏 CT 平扫和胸部 CT 的患者。CACS 的获取方式不同分为 4 组:由低、高年资的放射科医生基于心电图门控心脏 CT 平扫图像测量 CACS,分别记为门控-L、门控-H 组。采用基于 AI 的非门控胸部 CT 钙化积分软件获取 CACS,记为 AI 组。基于胸部 CT 由低年资放射科医生与 AI 软件协同获取 CACS,记作 AI+L 组。记录每例患者的各组 CACS 定量所需时间。以门控-H 组 CACS 测量值为金标准,评估并比较各组 CACS 值与金标准的相关性,以及危险度分层的准确性。探讨心率及体质指数(BMI)对 AI 软件测量 CACS 的影响。比较各种测量方法在时间上的差异。结果:AI 组计算 CACS 所需时间较门控-H、门控-L 组分别减少 39%、68%( $P<0.01$ );AI+L 组计算 CACS 所需时间较门控-H、门控-L 组分别减少 15%、55%( $P<0.01$ )。门控-L、AI、AI+L 组 CACS 与门控-H 组 CACS 相关性好,斯皮尔曼相关系数( $r$ )分别为 0.99、0.65、0.98( $P<0.01$ )。AI+L 组 CACS 危险度分层一致性优于门控-L 组及 AI 组,Kappa 系数( $\kappa$ )分别为 0.89、0.73、0.36( $P<0.01$ )。AI+L 组 CACS 危险度分层准确率显著优于其他组(92.0%、80.2%、52.3%, $P<0.01$ )。心率 $\geq 80$  次/分的患者 CACS 易被低估;BMI 对 CACS 测量无明显影响。结论:基于胸部平扫 CT 的 AI 与医生协同阅片模式与传统心电图门控 CACS 定量在数值及受检者危险度分层上有较高一致性且显著缩短了 CACS 测量时间,适用于亚临床人群冠心病风险等级的筛查。需注意心率偏高时 AI 软件会对 CACS 危险度分层产生低估。

**[关键词]** 冠状血管;人工智能;体层摄影术,X 线计算机

**[中图分类号]** R543.3;R814.42

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1008-1062(2024)10-0741-05

DOI:10.12117/jccmi.2024.10.013

The application value and influencing factors of coronary artery calcification score algorithm based on artificial intelligence in non-gated chest CT

GAO Ling-feng, ZHANG Qian, XU Hang, MA Yue, HOU Yang

(Department of Radiology, Shengjing Hospital of China Medical University, Shenyang 110004, China)

**Abstract: Objective:** To explore the application value of artificial intelligence (AI) software in the measurement of coronary artery calcification score(CACS) of non-gated chest CT and its influencing factors. **Methods:** A total of 237 patients who underwent both coronary computed tomography angiograph and chest CT within one month were included in this study retrospectively. Divided into four groups according to different acquisition methods for CACS: CACS was obtained by radiologists with different experiences(Low/High) based on ECG-gated cardiac CT images, and the two groups were labeled as gated-L and gated-H. The AI software automatically obtain the non-gated Agatston scores, and the results were checked and reedited by radiologist with low experience, the two groups were labeled as AI and AI+L. These Agatston scores and the time taken for each case were recorded. The diagnostic performances of each group were evaluated and compared on a basis with gated-H as gold standard. We discussed the influence of heart rate and BMI on diagnostic performance of AI. The time taken on each case of each group was compared. **Results:** The post-processing and calculating time on each case of AI was reduced by 39%, 68% compared with gated-H, gated-L(all  $P<0.01$ ), respectively. The checking and reediting times on each case of AI+L were reduced by 15%, 55% compared with gated-H, gated-L (all  $P<0.01$ ), respectively. The correlation of the gated-L, AI, AI+L-CACS with the gated-H CACS was  $r=0.99, 0.65, 0.98$  (all  $P<0.01$ ). The CACS risk categorization consistency in AI+L was better than that in gated-L and AI, and the Kappa coefficients ( $\kappa$ ) were 0.89, 0.73 and 0.36, respectively,  $P<0.01$ . The accuracy of CACS risk categorization in AI+L was 92.0%, which was significantly better than that in gated-L and AI(80.2% and 52.3%, respectively,  $P<0.01$ ). Patients with heart rate  $\geq 80$  bpm were more likely to be underestimated. Body mass index had no significant effect. **Conclusion:** The collaborative reading model of AI+doctor based on chest CT has high consistency

**[收稿日期]** 2024-01-17;**[修回日期]** 2024-02-06

**[作者简介]** 高峻峰(1996-),男,重庆人,住院医师。E-mail:601940371@qq.com

**[通信作者]** 侯阳,中国医科大学附属盛京医院放射科,110004。E-mail:huyang1973@163.com

**[基金项目]** 国家自然科学基金(82071920,82302186,82102035)。

with ECG-gated cardiac CT in CACS quantification and risk categorization of patients, and significantly shortens the time for measurement, which is more suitable for clinical risk grade screening of patients with coronary heart disease. It should be noted that when the heart rate is high, AI software will underestimate the risk stratification of CACS.

**Key words:** Coronary Vessels; Artificial Intelligence; Tomography, X-Ray Computed

冠状动脉钙化积分 (Coronary artery calcium score, CACS) 是动脉粥样硬化性心血管疾病风险预测及指导治疗的重要因子<sup>[1-3]</sup>。目前 Agatston 积分是临床应用最广泛的 CACS 指标<sup>[4]</sup>, 主要基于心电门控 CT 平扫图像进行半自动定量, 该过程耗时费力, 且需要较高水平的专业知识。临床工作中, CACS 的心电门控 CT 扫描通常与冠状动脉 CT 血管造影同步进行, 增加了患者的辐射剂量, 不利于其在无症状人群心血管疾病筛查中的广泛应用<sup>[5-6]</sup>。

近年来, 随着人工智能 (Artificial intelligence, AI) 技术的发展, 国内外已经开发了多种基于胸部 CT 图像进行自动钙化积分计算的软件<sup>[7-12]</sup>, 在 CACS 评估准确性和危险度分层一致性方面均有良好的表现。既往研究多侧重于技术实现可行性层面, 结果显示: 影响 AI 软件计算准确性的因素众多, 如图像重建算法<sup>[10]</sup>及 CT 设备扫描参数<sup>[12]</sup>等, 而患者的心率和体质质量指数 (Body mass index, BMI) 尚未被纳入正式研究。此外, 既往研究仅仅比较了胸部 CT 平扫结合 AI 与门控 CACS 扫描测量结果, 没有讨论基于胸部 CT 的 AI 与医生协同阅片模式 CACS 测量的准确性。

因此, 本研究对 AI 非门控胸部 CT 冠脉钙化积分软件的诊断效能进行了评估, 并探讨了心率和 BMI 对 AI 软件诊断性能的影响, 为明确 AI 软件性能、临床应用价值及改进方向提供依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

本研究回顾性随机抽取 2021 年 9 月—2022 年 6 月于本院同时行心电门控 CACS 扫描和胸部平扫 CT 的患者 400 例。排除经皮冠状动脉腔内成形术、冠状动脉旁路移植术、冠脉畸形及图像质量差 AI 无法识别的患者, 最终入组 237 例。男 124 例, 女 113 例。本研究通过中国医科大学附属盛京医院伦理审核 (伦理编号: 2023PS710K), 因为回顾性研究免除书面知情同意。

### 1.2 检查方法

心电门控心脏 CT: 采用双层光谱探测器 CT (IQon, v4.7.743210, Philips Healthcare, 荷兰)。患者采取仰卧位, 头先进。扫描范围: 气管隆突下 1 cm 至心脏膈面。心率小于 70 次/分的患者采用前瞻性心

电门控, 触发时相为 R-R 间期的 78%, 采集时相为触发时相 $\pm 3\%$ ; 心率大于 70 次/分的患者则采用回顾性心电门控。具体参数: 管电压 120 kV, 管电流自动调制, 球管转速 0.27 s/周, 准直器宽度 64 $\times$ 0.625 mm, D-FOV 200 mm, 重建层厚 2.5 mm, 层间距 2.5 mm。

胸部平扫 CT: 分别采用双源 CT (Definition, vA44A.09.P18, Siemens, 德国)、微平板 CT (Ingenuity, v4.1.6.25030, Philips Healthcare, 荷兰)、256 层螺旋 CT (Brilliance 256 CT, v4.1.7.19037, Philips Healthcare, 荷兰)、640 层动态容积 CT (Aquilion one, v4.74ER000, Canon, 日本)。患者采取仰卧位, 头先进。扫描范围: 胸廓入口至心脏膈面。扫描参数: 管电压为 100~120 kV, 管电流均为自动调制管电流, 球管转速 0.5 s/周, 螺距 1, 准直器宽度 64 $\times$ 0.625 mm、128 $\times$ 0.625 mm、320 $\times$ 0.5 mm, D-FOV 340~360 mm, 重建层厚 3 mm, 层间距 3 mm。

### 1.3 CACS 测量方法

心电门控 CT 的 CACS 测量: 由两名高年资 (诊断经验 20 年) 放射科医生共同手动勾画冠脉钙化, 随后由 CACS 软件 (Heartbeat CS, v3.5.0.2254, Philips Healthcare, 荷兰) 计算冠脉 CACS, 并以该值为金标准。记录该 CACS 及该过程所需要的时间, 且该组数据记为门控-H。同时, 由一名低年资 (诊断经验 1 年) 放射科医生以同样的方式进行手动勾选冠脉钙化, 并由上述软件计算 CACS, 记录该 CACS 及该过程所需要的时间, 该组数据记为门控-L。

非门控 CT 的 AI 自动 CACS 测量: 采用 AI-CACS 软件 (CACScoreDoc, v170.170.051acuda110, 数坤科技, 中国) 探查胸部平扫 CT 上的 CACS, 为了充分评估 AI 软件的性能, 我们将此分为以下两种模式: AI 测量及 AI+医生协同测量。① AI 测量: AI-CACS 软件自动完成心脏分割、冠状动脉钙化及其所属分支识别并计算 Agatston 积分等步骤, 最后输出结构化报告。记录 AI-CACS 及该过程所需时间, 该组数据记为 AI 组。② AI+医生协同测量: 在 AI 标注基础上, 由一名低年资 (诊断经验 1 年) 放射科医生检视并行必要的修正, 输出 CACS。记录该结果及该过程所需时间, 且该组数据记为 AI+L 组。

按照患者的危险度类别分为: 极低风险组 (CACS=0), 低风险组 (CACS 1~<100), 中风险组 (CACS 100~<400), 高风险组 (CACS $\geq$ 400)<sup>[13]</sup>。根据

患者的心率,分为低心率组( $<60$ 次/分),中等心率组( $60\sim<80$ 次/分),高心率组( $\geq 80$ 次/分)。根据患者的 BMI,分为正常组( $<24$  kg/m<sup>2</sup>),超重组( $24\sim<28$  kg/m<sup>2</sup>),肥胖组( $BMI\geq 28$  kg/m<sup>2</sup>)<sup>[4]</sup>。

#### 1.4 统计学分析

使用 SPSS 26.0(IBM,美国)进行统计分析。连续数据用  $\bar{x}\pm s$  或  $M(P_{25},P_{75})$  表示,分类数据用数值和百分比表示。以门控-H组 CACS 为金标准,采用 Spearman 相关评估各组和金标准组 CACS 的相关性。采用 Kappa 分析对门控-L组、AI组、AI+L组危险度分层进行一致性检验。采用卡方检验评估各组的危险度分层准确性差异。采用配对样本 Wilcoxon 秩和检验比较各组 CACS 测量时间的差异。采用 Mann-Whitney U 检验比较正确分类组与重新分类组心率差异,采用独立样本  $t$  检验比较正确分类组与重新分类组 BMI 差异,采用卡方检验评估 AI 组在不同心率、不同 BMI 的患者之间 CACS 危险度分层准确性的差异。 $P<0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 一般资料特征

本研究共纳入 237 例,中位年龄 64 岁(57.5~69 岁),52.3%为男性,经冠状动脉 CT 血管造影诊断无冠脉钙化病变的患者 50 例(21.0%),中位心率 66 次/分(59~72 次/分),平均 BMI(25.0 $\pm$ 3.6) kg/m<sup>2</sup>。

### 2.2 AI 与人工阅片时间比较

门控-H、门控-L、AI、AI+L 组进行计算 CACS 所需时间分别为:69.0 s (43.0~133.0 s)、132.0 s (73.0~196.0 s)、42.0 s (37.0~46.0 s)、60.0 s (51.5~68.0 s)。其中,AI 组较门控-L组所需时间减少最为显著,减少 68%( $P\leq 0.01$ )。

### 2.3 AI-CACS 与门控-CACS 的一致性分析

门控-H、门控-L、AI、AI+L 组 CACS 分别为:160.0 (23.0~464.5)、152.0 (25.5~423.5)、21.0 (0.0~139.0)、120.0 (14.0~404.0);AI 组正确识别及误判的案例见图 1~4。以门控-H组 CACS 为金标准,通过 Spearman 等级相关性分析,结果表明门控-L、AI、AI+L 组 CACS 均与门控-H组 CACS 具有很好的相关性,相关系数分别为:门控-L组( $r=0.99$ ),AI 组( $r=0.65$ ),AI+L 组( $r=0.98$ ), $P$ 值均小于 0.01。通过 Bland-Altman 一致性分析得出门控-L、AI、AI+L 组 CACS 与门控-H组 CACS 的偏差和 95%一致性极限,三者平均偏差分别为 29.5 (95%CI: -310.7~369.6)、299.8 (95%CI: -807.4~1405.0)、102.1 (95%CI: -351.3~555.6)。与 AI 组相比,门控-L组和 AI+L 组 CACS 与金标准的差值平均数更小,具有更好的一

致性。

### 2.4 AI-CACS 危险度分层准确性评估

门控-L组、AI+L组 CACS 与金标准组的危险度分层一致性较 AI 组好,Kappa 系数( $\kappa$ )分别为 0.73、0.89、0.36, $P$ 均 $<0.01$ 。AI+L组 CACS 危险度分层准确率为 92.0%,显著高于门控-L组及 AI 组(分别为:80.2%、52.3%, $P$ 均 $<0.01$ )。门控-L组共错误分类 46 例,其中高估 23 例、低估 23 例;AI 组共错误分类 113 例,均为低估;AI+L 组共错误分类 18 例,均为低估。

### 2.5 心率和 BMI 对 AI 组 CACS 危险度分层准确性的影响

根据非门控胸部 CT 平扫图像所得 AI 组 CACS 进行危险度分层,被错误分类患者的心率(68 次/分,60~73 次/分)高于被正确分类患者的心率(62 次/分,57~71 次/分, $P\leq 0.01$ ),表明心率高的患者更可能被错误分类。心率 $\leq 60$ 次/分的患者错误分类率为 34.3%(24/70),24 例患者危险度均被低估,其中 8 例被向下分类了 2 个等级,16 例被向下分类了 1 个等级;心率 $\geq 80$ 次/分的患者被错误分类率为 66.7%(16/24),16 例患者危险度均被低估,其中 1 例被向下分类了 3 个等级,5 例被向下分类了 2 个等级,8 例被向下分类了 1 个等级。被错误分类患者的 BMI (25.0 $\pm$ 3.4) kg/m<sup>2</sup>与被正确分类患者的 BMI (25.1 $\pm$ 3.8) kg/m<sup>2</sup>则无统计学差异( $P=0.86$ )。

## 3 讨论

CACS 是冠心病危险分层的重要指标。先前的研究已经证实基于胸部平扫 CT 图像的 AI 进行冠脉钙化负荷评估是可行的<sup>[7-12]</sup>。本研究以心电门控心脏 CT 钙化积分为金标准,评估了 AI 非门控钙化积分软件的诊断性能,尤其是探讨了低年资医生结合 AI 软件后对 CACS 评估准确性及效率的提升,明确了心率、BMI 对 AI 诊断效能的影响,这对 AI 软件性能的改进及临床推广具有重要的意义。

本研究发现 AI 软件所带来的时间效益显著。AI、AI+L 组阅片时间与医生单独阅片相比耗时大大减低,这与樊荣荣等<sup>[11]</sup>的研究结论相似。AI+L 组的协同阅片模式极大程度上提升了低年资医生的工作效率,耗时中位数百分比减少高达 55%,与此同时,危险度分层的准确率亦较低年资医生组显著提升了 11.8%,与高年资医生组准确率相当。该研究结论表明,AI 软件在缩短低年资医生阅片时间的同时,保证了良好的诊断效能,在实际临床工作中更推荐低年资医生结合 AI 软件进行 CACS 评估的高效工作模式。

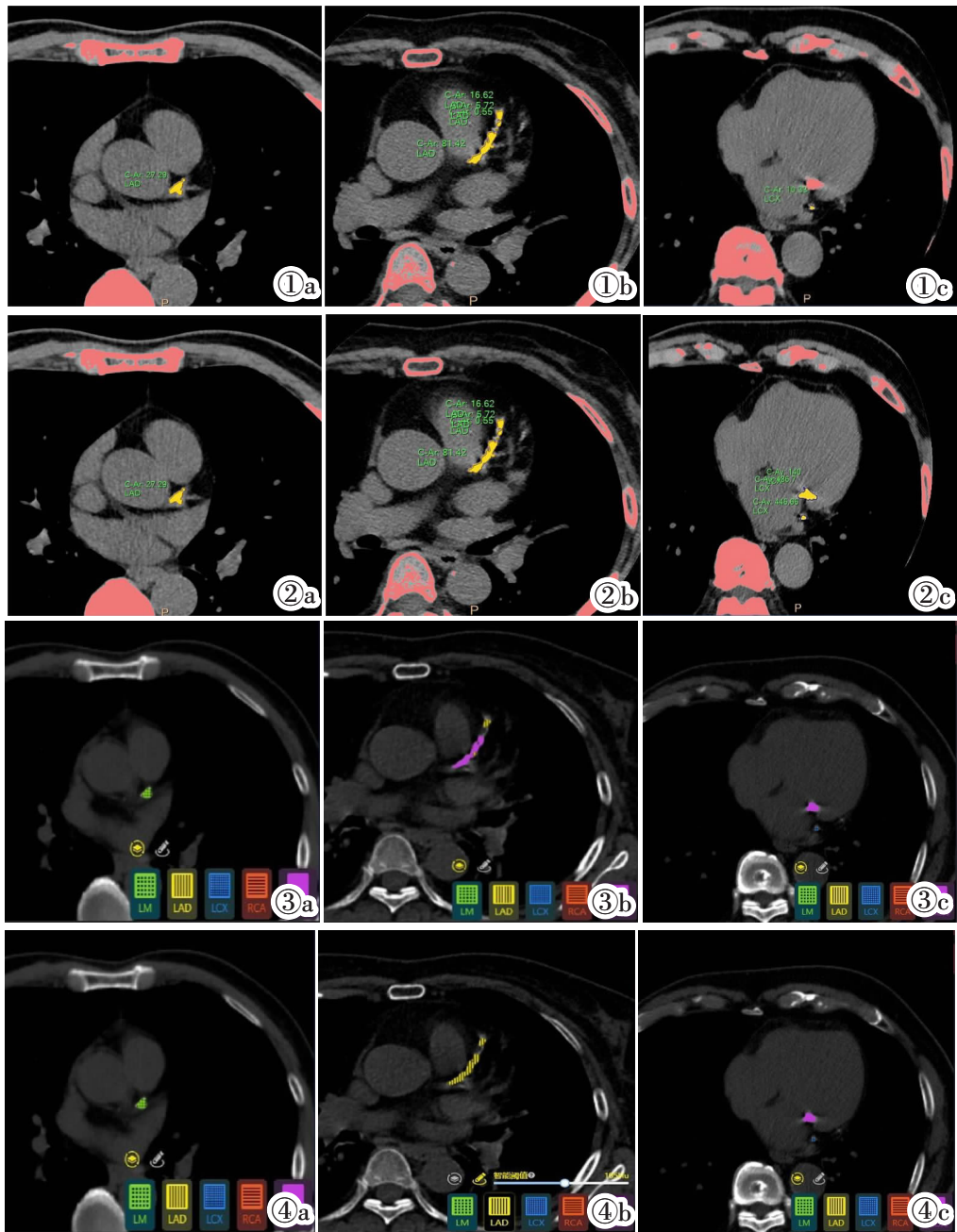


图 1~4 门控-H、门控-L、AI、AI+L 组 CACS 测量对照图。图 1a~4a 为男,60 岁,CACS 为 298,门控-L、AI、AI+L 组与门控-H 组测量值基本一致;图 1b~4b 为女,72 岁,CACS 为 986,图 3b 显示 AI 漏判前降支近段钙化,导致 CACS 减低,AI+L 组 CACS 与门控组基本一致;图 1c~4c 为男,82 岁,CACS 为 972。图 2c 显示门控-L 组将二尖瓣钙化误判为左回旋支钙化,导致 CACS 高,AI 组及 AI+L 组识别正确。

**Figure 1~4.** Comparison of CACS measurements between gated-H, gated-L, AI and AI+L. Figure 1a~4a: A 60-year-old man, the CACS gated-H measured is 298, which is nearly the same as that of gated-L, AI and AI+L; Figure 1b~4b: A 72-year-old woman, the CACS gated-H measured is 986. Figure 3b shows AI underestimated the CACS due to leaving out the diffuse calcified plaque of LAD, AI+L CACS is roughly the same as that of gated-L. Figure 1c~4c: A 82-year-old man, the CACS gated-H measured is 972, Figure 2c shows gated-L overestimated the CACS due to mistaking the calcification of mitral valve for LCX, AI and AI+L identified correctly.

本研究发现 AI、AI+L 组 CACS 均与门控-H 组 CACS 具有良好的相关性,与先前的研究结论相似<sup>[7-9,12]</sup>,并且我们发现 AI 组与门控-H 组相关性低于 AI+L 组,在严重钙化时 AI 软件更易出现低估,这可能与本研究采用的胸部 CT 图像层厚为 3 mm

有关,较厚的层厚可能会造成部分钙化病变的遗漏,但 3 mm 层厚是常规胸部 CT 的标准层厚,因此本研究结果更接近真实世界应用场景。此外,当钙化为弥漫性或位于右冠状动脉中段时较易被 AI 软件遗漏导致低估,原因是 AI 软件将弥漫钙化误判为冠脉支

架或运动伪影导致钙化形态异常导致 AI 识别失败。人机协同的阅片模式会显著减低这种误判,使 CACS 结果更准确。

在 CACS 危险度分层方面,本研究发现人机协同阅片模式具有最高的准确率 92%,显著高于 AI 组及门控-L 组,这一结果亦高于 Xu 等<sup>[12]</sup>应用 AI 软件进行 CACS 分层得出的准确率 80.6%。同时,AI+L 组对于 CACS 数值上的低估并未降低风险类别。上述结果提示人机协同是胸部平扫 CT 定量 CACS 的最佳工作模式。

本文显示,心率高的患者被错误分类的概率更大,心率 $\geq 80$ 次/分的患者被错误分类率高达 66.7%,而心率 $< 60$ 次/分的患者被错误分类率为 34.3%,二者之间的差异具有统计学意义( $P < 0.01$ )。其原因是心脏搏动产生的运动伪影导致钙化斑块的形状、密度、位置发生变化,使 AI 软件的识别发生偏差<sup>[12,15]</sup>,如非门控时常见的冠脉钙化的星芒状伪影,可能导致钙化区域最高 CT 值的降低,从而造成 CACS 的下降。因此,目前并不推荐心率较快的人群仅用 AI 软件获取 CACS,希望未来有研究能推出相关矫正系数或更好的算法来补偿运动伪影导致的偏差。先前研究<sup>[16-17]</sup>发现在采用固定管电压和管电流的情况下肥胖患者的胸部 CT 图像噪声较高,从而影响 CACS 的评估。本研究发现 BMI 对 AI 软件的诊断性能并无明显影响,原因是胸部 CT 扫描采用了管电流自动调制技术,根据患者的体型进行管电流调节,因而在一定程度上解决了肥胖引起的图像噪声过大的问题。

本研究尚存在一些局限性:①没有评估 AI 软件对于冠脉各分支的钙化积分计算的准确性;②本研究为单中心小样本回顾性研究,今后将进一步增加样本量,纳入多中心数据针对扫描参数的影响作进一步验证;③本研究涉及 CT 设备较多,未对不同设备图像的 AI 软件表现进行评估。

总之,基于胸部平扫 CT 的 AI 与医生协同阅片模式在 CACS 定量与受检者危险度分层的准确性上与传统方法有较好的一致性。值得注意的是心率偏高可能导致 CACS 被低估,影响危险度分层的准确性。以上结果为今后软件优化及临床应用提供了进一步依据。

#### [参考文献]

[1]Roth GA, Johnson C, Abajobir A, et al. Global, Regional, and National Burden of Cardiovascular Diseases for 10 Causes, 1990 to 2015[J]. J Am Coll Cardiol, 2017, 70(1): 1-25.  
[2]Mitchell JD, Paisley R, Moon P, et al. Coronary Artery Calcium

and Long-Term Risk of Death, Myocardial Infarction, and Stroke: The Walter Reed Cohort Study [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2018, 11(12): 1799-1806.

- [3]Haq A, Miedema MD. Coronary Artery Calcium for Risk Assessment in Young Adults [J]. Curr Atheroscler Rep, 2022, 24 (5): 337-342.  
[4]Agatston AS, Janowitz WR, Hildner FJ, et al. Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography [J]. J Am Coll Cardiol, 1990, 15(4): 827-832.  
[5]Kim KP, Einstein AJ, Berrington de González A. Coronary artery calcification screening: estimated radiation dose and cancer risk [J]. Arch Intern Med, 2009, 169(13): 1188-1194.  
[6]谭晶,侯阳,郭文力,等.全模型迭代重建技术在冠状动脉钙化模体扫描中的应用价值研究 [J].中国临床医学影像杂志,2016,27(12):867-870.  
[7]van Assen M, Martin SS, Varga-Szemes A, et al. Automatic coronary calcium scoring in chest CT using a deep neural network in direct comparison with non-contrast cardiac CT: A validation study [J]. Eur J Radiol, 2021, 134: 109428.  
[8]van Velzen SGM, Lessmann N, Velthuis BK, et al. Deep Learning for Automatic Calcium Scoring in CT: Validation Using Multiple Cardiac CT and Chest CT Protocols [J]. Radiology, 2020, 295(1): 66-79.  
[9]Isgum I, Prokop M, Niemeijer M, et al. Automatic coronary calcium scoring in low-dose chest computed tomography [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2012, 31(12): 2322-2334.  
[10]Lessmann N, van Ginneken B, Zreik M, et al. Automatic Calcium Scoring in Low-Dose Chest CT Using Deep Neural Networks With Dilated Convolutions [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2018, 37(2): 615-625.  
[11]樊荣荣,刘凯,夏晨,等. AI 对非门控胸部 LDCT 平扫冠状动脉钙化积分危险分层的预测价值 [J]. 国际医学放射学杂志,2022,45(1):21-26.  
[12]Xu J, Liu J, Guo N, et al. Performance of artificial intelligence-based coronary artery calcium scoring in non-gated chest CT [J]. Eur J Radiol, 2021, 145: 110034.  
[13]Xia C, Vonder M, Pelgrim GJ, et al. High-pitch dual-source CT for coronary artery calcium scoring: A head-to-head comparison of non-triggered chest versus triggered cardiac acquisition [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2021, 15(1): 65-72.  
[14]中国肥胖问题工作组数据汇总分析协作组. 我国成人超重指数和腰围对相关疾病危险因素异常的预测价值: 适宜体重指数和腰围切点的研究 [J]. 中华流行病学杂志,2002,23(1):10-15.  
[15]Fan R, Shi X, Qian Y, et al. Optimized categorization algorithm of coronary artery calcification score on non-gated chest low-dose CT screening using iterative model reconstruction technique [J]. Clin Imaging, 2018, 52: 287-291.  
[16]Husmann L, Leschka S, Boehm T, et al. Influence of body mass index on coronary artery opacification in 64-slice CT angiography [J]. Rofo, 2006, 178(10): 1007-1013.  
[17]Willeminck MJ, Abramiuc B, den Harder AM, et al. Coronary calcium scores are systematically underestimated at a large chest size: A multivendor phantom study [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2015, 9(5): 415-421.