

· 心血管影像学 ·

基于深度学习技术的非门控胸部 CT 冠脉钙化积分系统的准确性评价

闫玉辰, 胡磊, 王焰, 彭宙锋, 孙建清, 查云飞

【摘要】 目的:评价基于深度学习(DL)技术的非门控胸部 CT 冠脉钙化积分系统的准确性。**方法:**本研究回顾性纳入 1441 例因常规体检而行非增强胸部 CT 平扫的中老年患者。所有患者图像分别导入 GE 后处理工作站 smartscore 钙化积分软件以及基于深度学习的非门控胸部 CT 智能钙化积分软件。按照解剖部位将两种方法获得的 Agatston 评分划分为冠状动脉总评分(TOTAL)、左主干(LM)评分、左前降支(LAD)评分、左回旋支(LCX)评分以及右冠状动脉(RCA)评分。采用 Pearson 相关系数分析两种方法下测得钙化积分相关性,同时对测得不同厂家、不同机型各分支钙化积分及总钙化积分的统计学差异评估以及对两种不同管电压下的钙化积分差异进行比较采用配对 t 检验;采用组内相关系数(ICC)对两种方法测得的钙化积分进行一致性检验,所有结果以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。**结果:**Pearson 相关系数显示两组方法测量所有机型下大部分 TOTAL, LM, LCX, RCA 的 Agatston 积分具有较好的相关性($P > 0.05$),两种方式所得钙化积分差异无统计学意义($P > 0.05$),但在 Light-Speed VCT 机型中两组 RCA 钙化积分差异具有统计学意义($P < 0.05$); 120 kVp、100 kVp 两种管电压下两组测得 CACS 大部分差异无统计学意义,但在 Optima CT680 Series 机型中 120 kVp 下两者 TOTAL 差异具有统计学意义($P < 0.05$); ICC 分析发现两种方法下大部分所获的钙化积分具有较好的一致性(ICC: 0.710~0.996),其中六中机型中两种方式下总钙化积分的组内相关系数分别为 BrightSpeed (ICC: 0.875, 95% CI: 0.833~0.905)、Revolution CT (ICC: 0.834, 95% CI: 0.761~0.883)、LightSpeed VCT (ICC: 0.763, 95% CI: 0.688~0.822)、Optima CT680 Expert (ICC: 0.723, 95% CI: 0.590~0.815)、SOMATOM go.Top (ICC: 0.967, 95% CI: 0.955~0.975)、uCT 550 (ICC: 0.988, 95% CI: 0.984~0.991)。**结论:**基于深度学习的钙化积分算法在不同 CT 机型及不同管电压的扫描条件下对冠脉分支钙化积分的评估均具有较高的准确性。

【关键词】 冠状动脉钙化; 深度学习; 非门控钙化积分; 管电压

【中图分类号】 R814.42; R-05 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)03-0273-06

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.03.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Accuracy evaluation of non-gated coronary calcification score system on chest CT based on deep learning technology YAN Yu-chen, HU Lei, WANG Yan, et al. Department of Radiology, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430060, China

【Abstract】 Objective: To evaluate the accuracy of a non-gated coronary calcification scoring system for chest CT based on deep learning (DL) technology. **Methods:** This study retrospectively included 1441 middle-aged and elderly patients who underwent unenhanced non-enhanced chest CT plain scan due to routine physical examination. The coronary artery calcification score was recorded by GE post-processing workstation SmartScore calcification score software and non-gated chest CT intelligent calcification score software based on deep learning. The Agatston scores obtained by these two methods mainly included TOTAL coronary artery score (TOTAL), left main coronary artery (LM) score, left anterior descending branch (LAD) score, left circumflex artery (LCX) score and right coronary artery (RCA) score. Pearson's correlation coefficient was used to analyze the correlation between the measured calcification scores of two measuring methods, and paired t -test was also used to assess the

作者单位: 430060 武汉, 武汉大学人民医院放射科(闫玉辰、胡磊、王焰、彭宙锋、查云飞); 100176 北京, 数坤(北京)网络科技有限公司(孙建清)

作者简介: 闫玉辰(1994-), 女, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事血管及肌骨病变影像学 research。

通讯作者: 查云飞, E-mail: zhayunfei999@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(81871332); 国家自然科学基金资助项目(82171895)

statistical differences between the measured calcification scores and total calcification scores for each branch of different manufacturers and models, and to compare the differences in calcification scores under two different tube voltages. Intraclass correlation coefficients (ICC) was used to test the consistency of the calcification integrals measured by the two methods. $P < 0.05$ was considered statistically significant. **Results:** Pearson correlation coefficient showed that Agatston scores of most TOTAL, LM, LCX and RCA measured by the two groups had a good correlation ($P > 0.05$), and no statistical difference between the calcification integrals obtained by the two methods ($P > 0.05$), but in the LightSpeed VCT model the difference between the RCA calcification integrals of the two groups was statistically significant ($P < 0.05$). Most of the differences in CACS between the two groups at 120kVp and 100kVp were not statistically significant, but the difference in TOTAL between the two groups at 120kVp was statistically significant in the Optima CT680 Series model ($P < 0.05$); ICC analysis found that most of the calcification scores obtained by the two methods. The intra-group correlation coefficient of the total calcification score between the two methods in the six models were BrightSpeed (ICC: 0.875, 95% CI: 0.833~0.905), Revolution CT (ICC: 0.834, 95% CI: 0.761~0.883), and Light-Speed CT (ICC: 0.834, 95% CI: 0.761~0.883), LightSpeed VCT (ICC: 0.763, 95% CI: 0.688~0.822), Optima CT680 Expert (ICC: 0.723, 95% CI: 0.590~0.815), SOMATOM go. (ICC: 0.967, 95% CI: 0.955~0.975), uCT 550 (ICC: 0.988, 95% CI: 0.984~0.991). **Conclusion:** The deep learning-based calcification integration algorithm has high accuracy in the evaluation of coronary artery branch calcification score under different CT models and different tube voltages.

【Key words】 Coronary artery calcification; Deep learning; Non-gating calcification score; Tube voltage

冠状动脉粥样硬化导致冠状动脉(简称冠脉)狭窄、心肌缺血坏死从而引发冠心病(coronary heart disease, CHD),严重时导致急性冠脉综合征,是心血管疾病死亡的主要原因^[1]。冠状动脉钙化(coronary artery calcification, CAC)是预测心血管疾病发展的独立因素,而 CAC 积分是评估冠状动脉粥样硬化斑块负担和预测心血管疾病风险的重要影像学指标^[2-4]。目前, CAC 积分主要是在心电门控下心脏冠脉 CT 平扫获得。多项研究表明,在非心电门控下胸部 CT 扫描上获得的 CAC 积分也可以预测 CVD 的风险^[5-7],其中也包括从肺癌筛查的低剂量胸部 CT 图像中评估冠脉钙化积分^[6-7]。

近年来,基于深度学习(deep learning, DL)的自动钙化积分达到了接近人工评价的性能水平^[8,9],但是,在实际临床场景中,由于扫描机型、参数设置、患者自身条件等诸多因素的影响,不同患者的冠脉 CT 图像存在差异。DL 模型对于医学图像的微小变动十分敏感,即使轻微角度、噪声,甚至局部像素的变化,都可以导致模型识别或分类错误^[10]。因此,基于 DL 的自动钙化积分在实际临床应用中的准确性目前尚未确定,本研究旨在评价基于 DL 技术对不同扫描机型及不同管电压下获得的非门控胸部 CT 平扫图像 CAC 积分的准确性。

材料与方法

1. 基本临床信息

本回顾性研究初始纳入 1800 例在 2019 年 11 月—2020 年 1 月因胸部体检于武汉大学人民医院放射科 7 台 CT 设备上行非增强胸部 CT 平扫的中老年患者。排除标准:既往心脏、冠脉手术史(包括植入心脏起搏器、心脏支架置入术、冠状动脉旁路移植术、植入机械人工瓣膜)以及因心律失常、呼吸配合不佳、重度弥漫钙化导致伪影较严重者;CT 影像数据不完整者。病例筛选流程见图 1。本研究最终纳入 1441 例

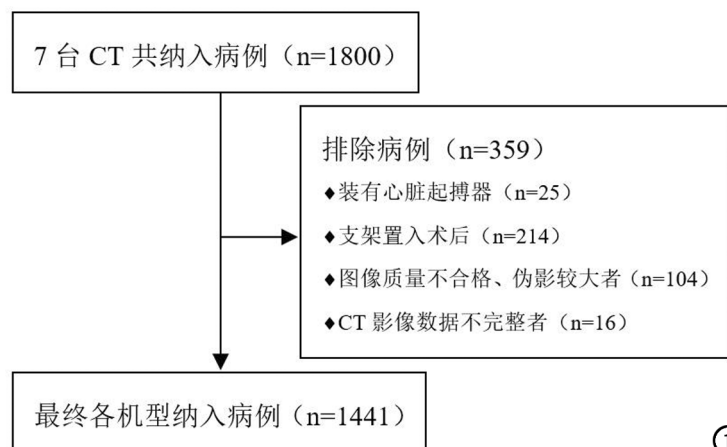


图 1 本研究的流程图。

表 1 不同 CT 扫描机型受试者基本临床信息

机型	例数	年龄	性别	
			男(阳性)	女(阳性)
GE				
BrightSpeed	348	60(57,66)	213(118)	135(54)
Optima CT680 Series	302	63(59,68)	173(99)	129(57)
Revolution CT	158	63(57,69)	97(65)	62(45)
LightSpeed VCT	172	61(58,66)	105(58)	68(32)
Optima CT680 Expert	90	62(57,66)	54(20)	37(13)
Siemens				
SOMATOM go.Top	177	62(56,70)	87(42)	91(40)
联影				
uCT 550	194	60(57,63)	63(20)	127(29)
合计	1441	62(57,67)	792(422)	649(270)

注:非正态分布数据以中位数(上、下四分位数)表示。阳性为存在钙化的病例。

患者,其中男 792 例,女 649 例,平均年龄 62±6 岁,所有病例详细临床信息见表 1。

2.胸部 CT 扫描参数

所有患者在非心电图控扫描模式下,采用仰卧位,头先进体位,胸部扫描覆盖范围从胸廓入口至膈肌下 10 mm。所获得 CT 图像均为 DICOM 格式,分别从 GE、Siemens 和联影设备中获取,详细设备及扫描参数设置见表 2。

表 2 不同 CT 扫描机型的扫描参数

机型	排数	电压(kVp)	层厚(cm)
GE			
BrightSpeed	16	100	0.6
Optima CT680 Series	64	100/120	0.6
Revolution CT	256	120	0.6
LightSpeed VCT	64	100	0.6
Optima CT680 Expert	16	120	0.5
Siemens			
SOMATOM go.Top	64	120	0.5
联影			
uCT 550	64	120	0.5

3.半自动钙化积分评价

半自动钙化积分分析由 2 名具有 3 年以上心胸影像学诊断经验的放射科医师进行勾画和分析。正式勾画前,为评估不同测量者间一致性以及同一测量者的可重复性,2 名医师分别在不知晓患者任何临床信息的情况下独自对 100 名患者图像进行半自动标记。时间间隔一周以后,打乱患者图像排列顺序,2 名医师再次对所有患者图像进行评估。

1441 名患者非增强胸部 CT 图像数据随机平均分配给两名医生进行勾画和分析;使用 GEAW4.6 后处理工作站 Smartscore 软件进行半自动钙化分析,观察者通过手动识别病变,并根据病变的解剖位置进行标记,包括左主干(left main coronary artery, LM),左前降支(left anterior descending branch, LAD),左回旋支(left circumflex artery, LCX)以及右冠状

动脉(right coronary artery, RCA);随后,将每一层病变内所有连续钙化区域进行三维成分标记,即为钙化体积;Smartscore 软件显示了三个或三个以上的相邻体素超过 130 HU 的所有区域,并用伪彩色覆盖,其中对角支和钝缘支的钙化分别计算在 LAD 和 LCX 的钙化内,采用 Agatston 方法计算出钙化体积(mm³)。两种方法的标注对照见图 2。

4.基于 DL 的自动钙化积分评价

在非增强胸部 CT 图像上采用基于自动 DL 的系统(non-gated CAC Score Doc, ShuKun Techonolgy, 北京)自动计算 CAC 评分。该系统自动完成多个步骤,包括界定心脏区域范围,检测和分割冠状动脉钙化病变,根据识别出的钙化区域计算出体积、质量和 Agatston 评分。最后,该系统会自动输出 CAC 分数和风险类别的结构化或描述性报告。

该 DL 算法包括以下几个步骤:首先,建立一种改进的 3D U-Net DL 模型来完成心脏分割,以降低计算成本和误报率。原始的 3D U-net 架构分别有四层编码器和解码器^[10-12],为了改进 3D U-net 的架构,在每两层之间添加了 1×1、3×3 和 1×1 卷积的 Bottle-Neck 设计。在模型训练之前,将训练和验证队列标准化以去除平均值,然后对标准化后的图像进行下采样,得到较低分辨率的特征图谱。接下来,将下采样的图像导入网络并进行训练以分割心脏区域,然后对这些

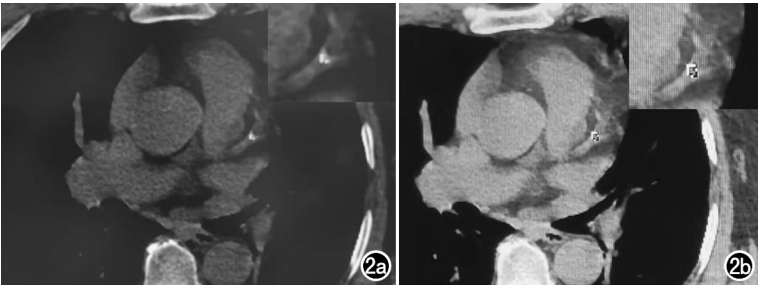


图 2 非门控下两种勾画方法。a)半自动勾画;b)基于 DL 勾画。

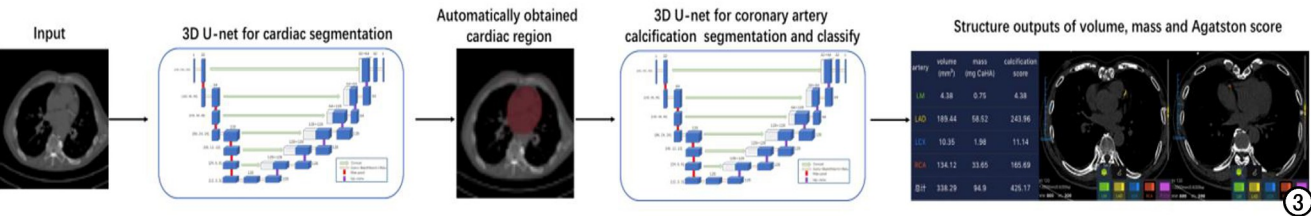


图 3 DL 算法步骤。

特征进行上采样以获得全分辨率的分割图。每个下卷积或上卷积都包含一个卷积运算,并使用一个线性校正函数(rectified linear unit,ReLU)作为激活函数^[12]。由于笔者主要关注心脏的位置,故这一步对分割精度要求较低;该模型对心脏进行分割后,将心脏区域内的图像切割出来作为下一个模型的输入数据(图 3)。第二步,采用另一种三维 U-Net DL 模型对冠状动脉钙化病变进行分割,并按分支进行分类。在这一步中,目标区域的输出不仅包含像素是否为钙化区域的信息,还包含该像素属于冠状动脉哪个分支的信息(分割图像灰度值的对应关系为:LAD=1,LCX=2,RCA=3,LM=4)。DL 模型的结构与上一步的网络结构一致。第三步是根据图像分割结果计算钙化分数,估计钙化区域中包含的体素数量和相应体素的 HU 值;其中体积、质量和 Agatston 评分均按以往研究计算^[13-14]。

用 1 减去平均 Dice 相似度评分得到的 Dice 损失来训练网络^[12];将结果与使用 Dice 损失的手动注释的感兴趣轮廓的地面实况进行了比较。比较训练集和验证集的损失序列。当验证集为最优时,损失对应的模型为本次训练得到的模型准确性较好^[15]。最终的算法性能评估涉及两个方面:钙化判断是否准确(二分

类指标)和钙化区所属的冠状动脉分支是否准确(多分类指标)。

5.统计学分析

采用统计学软件 SPSS 23.0(Chicago, IL, USA)对数据进行统计分析。采用 Pearson 相关系数分析及配对 *t* 检验比较不同机型下两组算法间不同冠脉区域 Agatston 评分的相关性及一致性;对于两种不同管电压下的钙化积分差异采用配对 *t* 检验进行比较。采用组内相关系数 (intraclass correlation coefficients, ICC)对两组各分支及总积分进行一致性检验,ICC 值 <0.6 为一致性一般,0.6≤ICC 值<0.8 为一致性好,0.8≤ICC 值<1.0 为一致性较强。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

结 果

1.不同 CT 机型冠状动脉钙化积分值比较及相关性分析

两位医师在勾画 CAC 上具有较好的一致性(ICC ≥0.8)。经过计算不同机型下各分支钙化积分值见表 3;两组不同方法测得 6 台不同 CT 设备胸部 CT 图像中冠脉各分支 Agatston 钙化积分相关性分别为

表 3 两种方式测得各机型各分支 CAC 积分均值

机型	LM	LAD	LCX	RCA	TOTAL
BrightSpeed					
CACSM	26.00±56.89	114.72±158.96	34.24±68.88	59.42±102.64	141.12±194.16
CACSDL	42.89±61.71	110.42±158.23	39.29±63.25	62.07±107.46	144.92±194.84
Revolution CT					
CACSM	24.90±26.45	119.11±189.37	103.91±294.67	77.86±142.25	185.88±363.73
CACSDL	30.20±32.60	122.48±182.43	98.73±260.47	79.57±146.76	188.73±348.96
LightSpeed VCT					
CACSM	22.11±26.05	86.95±137.09	39.45±74.35	86.25±104.68	135.44±224.12
CACSDL	18.77±22.96	115.91±209.50	62.88±83.68	71.08±95.74	143.03±244.62
Optima CT680 Expert					
CACSM	45.00 *	90.35±118.73	8.8±6.65	14.00±12.69	83.77±116.74
CACSDL	74.98 *	93.21±108.52	53.51±47.67	17.38±16.66	97.03±124.06
SOMATOM go.Top					
CACSM	45.33±36.93	117.48±171.09	93.33±165.30	134.52±250.16	198.21±377.65
CACSDL	54.04±40.39	123.91±171.70	97.77±167.00	134.89±36.43	210.77±370.14
uCT 550					
CACSM	9.50±12.02	83.66±99.64	55.33±37.58	59.75±76.02	85.14±122.57
CACSDL	10.34±1.93	81.51±100.11	54.60±44.92	60.09±81.24	84.00±128.02

注:CACSM 和 CACSDL 分别表示人工和深度学习测量得到的钙化积分;正态分布数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示;* 代表总例数≤1,无法计算。

BrightSpeed($P=0.577, 0.981, 0.891, 0.979$)、Revolution CT($P=0.907, 0.990, 0.997, 0.990$)、LightSpeed VCT($P=0.951, 0.670, 0.781, 0.937$)、Optima CT680 Expert($P=0.887, 0.893, 0.908$)、SOMATOM go.Top($P=0.891, 0.948, 0.988, 0.994$)、uCT 550($P=0.999, 0.974, 0.909, 0.958$);各分支配对 t 检验显示两种方式下 BrightSpeed($P=0.140, 0.102, 0.259, 0.331$)、Revolution CT($P=0.109, 0.231, 0.381, 0.519$)、LightSpeed VCT($P=0.259, 0.141, 0.063, 0.006$)、Optima CT680 Expert($P=0.793, 0.075, 0.364$)、SOMATOM go.Top($P=0.193, 0.363, 0.372, 0.838$)、uCT 550($P=0.946, 0.565, 0.953, 0.960$)、Optima CT680 Expert 中 LM 因总例数较少,两者无法计算 P 值。Pearson 相关性分析显示在不同 CT 机型两种算法间的总钙化积分相关系数分别为:0.986、0.994、0.987、0.919、0.988、0.985。

2.同一机型不同管电压下 CAC 积分值的差异比较
在同一机型两种管电压条件下,两组冠脉总体钙化积分、LM、CX 和 RCA 大部分钙化积分差异无统计学意义,GE Optima CT680 Series 设备 100 kVp、120 kVp 管电压各分支及总值 t 值分别为 -1.155 、 0.079 、 0.875 、 -1.374 、 -0.273 及 -0.676 、 -1.726 、 -1.957 、 -1.281 、 -3.054 ,其中 120 kVp 管电压下 TOTAL 钙化积分差异具有统计学意义, $P<0.05$ (表 4)。

表 4 Optima CT680 Series 两组电压间各分支钙化积分差异性分析

分支	100kVp	120kVp	P 值
LM			
CACSM	62.46±138.28	49.00±39.74	0.261
CACSDL	107.17±201.97	52.81±50.50	0.937
LAD			
CACSM	138.33±209.27	162.50±234.06	0.389
CACSDL	137.48±210.32	173.27±255.15	0.179
LCX			
CACSM	124.39±206.52	94.97±165.96	0.785
CACSDL	96.27±134.05	105.11±181.74	0.508
RCA			
CACSM	107.72±187.62	245.48±389.56	0.089
CACSDL	145.48±211.48	257.79±405.94	0.058
TOTAL			
CACSM	229.13±407.63	286.54±517.38	0.210
CACSDL	233.49±397.39	304.84±540.98	0.003

注:CACSM 和 CACSDL 分别表示人工和深度学习测量得到的钙化积分;正态分布数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示。

3.两种方法下不同机型钙化积分值一致性检验
采用 ICC 评价各机型、各分支间钙化评分的一致性,大部分两者 Agatston 积分一致性较好,GE Optima CT680 Expert 和 uCT 550 中 LM 因例数较少,无法算出(表 5)。

讨 论

本研究表明,在不同机型的非门控胸部 CT 扫描图像中,基于 DL 的冠脉钙化软件测得的各个分支及总的钙化积分与人工测得的各数值具有较高的一致性。在临床上,测量 CAC 积分的金标准仍是心电门控 CTA 扫描,而非门控胸部 CT 扫描作为一种非专用的 CAC 积分扫描方法,已有研究证明,非门控胸部 CT 平扫评估 CAC 积分是可行的,它与门控扫描下评价动脉钙化程度没有显著差异^[6,16-18],且陈杰等^[19]重新定义了钙化积分的新危险程度分层,并取得了一定程度的优越性;在一个长期随访的研究中,Hughes-Austin 等^[18]发现门控下 CTA 与非门控胸部 CT 扫描下,CAC 积分值与心血管疾病死亡率密切相关且两者均能很好的预测受试者生存率。但这些研究均笼统从多个机型的图像中评估非门控冠状动脉钙化积分的可行性,并未通过大数据验证对于来源不同机型及参数扫描下胸部 CT 中钙化积分的准确性。

本研究的创新点在于使用基于 U-NET 分割技术针对 7 种不同的机型及同种机型的不同管电压的扫描条件下所得 CAC 积分的准确性,与人工勾画后的 CAC 积分相比,两者具有较好的一致性;为临床通过常规 CT 扫描提供更准确的冠脉钙化积分提供了更有力的依据。基于 U-NET 分割技术计算钙化积分算法验证了在不同机型及在同一机型不同管电压扫描条件的图像中,该软件对于检测到 CAC 的适配性,且与人工勾画后计算的钙化积分相比,两者具有较高的一致性,一定程度上为临床中无症状 CAC 患者在不同机型及不同管电压下检测评估钙化积分提供了较好的可行性。

在最新研究中^[9],共 7240 例来自多家医院的 9 种不同扫描方式的胸部 CT 图像(包括门控与非门控扫描)验证了 DL 钙化评分算法用于定量冠状动脉和胸主动脉钙化的可行性及稳定性;同时研究表明在使用

表 5 两种方式测得各机型各分支一致性检验

机型	LM	LAD	LCX	RCA	TOTAL
BrightSpeed	0.793(0.440,0.932)	0.827(0.710,0.890)	0.881(0.793,0.933)	0.941(0.896,0.966)	0.875(0.833,0.905)
Revolution CT	0.71(0.248,0.908)	0.757(0.626,0.842)	0.836(0.704,0.911)	0.98(0.957,0.990)	0.834(0.761,0.883)
LightSpeed VCT	0.941(0.776,0.986)	0.577(0.394,0.716)	0.751(0.463,0.894)	0.863(0.728,0.929)	0.763(0.688,0.822)
Optima CT680 Expert	—	0.727(0.387,0.876)	0.973(0.624,0.996)	0.874(0.339,0.986)	0.723(0.590,0.815)
SOMATOM go.Top	0.909(.738,.971)	0.947(0.915,0.967)	0.931(0.865,0.966)	0.992(0.985,0.996)	0.967(0.955,0.975)
uCT 550	—	0.973(0.952,0.985)	0.958(0.739,0.994)	0.958(0.870,0.987)	0.988(0.984,0.991)

注:括号内为 ICC 的 95%CI;— 表示 ICC 数据无法计算。

特定的 CT 图像增强算法训练后,能够进一步提高了算法性能。但是,该研究并未针对不同管电压条件下算法差异进行进一步亚组分析,本研究通过 100 kVp 及 120 kVp 两组不同管电压发现了同一机型不同管电压下所测得两者 CAC 积分的一致性,这说明了不同管电压的扫描条件下基于 DL 的算法的稳定性。

本研究的局限性:首先,在比较各分支间的钙化积分发现,基于 DL 的非门控冠状动脉钙化积分软件测得的 LM、LCX 的分值偏高,可能是因为人工智能在区分主动脉根部与 LM、LM 与 LCX/LAD 的解剖学分界欠清晰,同时较大钙化及呼吸运动会产生伪影累积临近区域。第二,所有收集的数据中,钙化检出率存在漏诊,其中对于少发区域的冠脉病例数较少,准确率较低,仍需要今后进一步大样本研究证实。第三,对于心包膜的钙化,基于 DL 的人工智能识别并计算在临近走行血管区域内,可使得 RCA 结果偏高。未来可以通过大量的数据分析和计算机学习,加上算法的改进,逐步提高人工智能对冠脉钙化识别的准确度,使 DL 方法可以在非增强胸部 CT 图像中辅助放射科医生报告冠状动脉钙化。

总之,基于深度学习 U-NET 分割技术的钙化积分算法在不同 CT 机型及不同管电压的扫描条件下对冠脉分支钙化积分的评估均具有较高的准确性。

参考文献:

- [1] Carr JJ, Jacobs DJ, Terry JG, et al. Association of coronary artery calcium in adults aged 32 to 46 years with incident coronary heart disease and death[J]. *JAMA Cardiol*, 2017, 2(4): 391-399.
- [2] Joshi PH, Patel B, Blaha MJ, et al. Coronary artery calcium predicts cardiovascular events in participants with a low lifetime risk of cardiovascular disease; the multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA)[J]. *Atherosclerosis*, 2016, 246: 367-373.
- [3] Grundy SM, Stone NJ, Bailey AL, et al. 2018 AHA/ACC/AACVPR/AAPA/ABC/ACPM/ADA/AGS/APhA/ASPC/NLA/PCNA Guideline on the Management of Blood Cholesterol: Executive Summary: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 73(24): 3168-3209.
- [4] 王大博,郑敏文.冠状动脉钙化:CT 定量评估的方法、临床意义及方向[J]. *放射学实践*, 2018, 33(7): 767-769.
- [5] Hecht HS. Coronary artery calcium scanning: past, present, and future[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8(5): 579-596.
- [6] Chiles C, Duan F, Gladish GW, et al. Association of coronary artery calcification and mortality in the national lung screening trial: a comparison of three scoring methods[J]. *Radiology*, 2015, 276(1): 82-90.
- [7] 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.
- [8] Setio A, Traverso A, de Bel T, et al. Validation, comparison, and combination of algorithms for automatic detection of pulmonary nodules in computed tomography images: the LUNA16 challenge[J]. *Med Image Anal*, 2017, 42: 1-13.
- [9] van Velzen S, 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.
- [10] Park SH, Han K. Methodologic guide for evaluating clinical performance and effect of artificial intelligence technology for medical diagnosis and prediction[J]. *Radiology*, 2018, 286(3): 800-809.
- [11] Falk T, Mai D, Bensch R, et al. U-Net: deep learning for cell counting, detection, and morphometry[J]. *Nat Methods*, 2019, 16(1): 67-70.
- [12] Wang W, Wang H, Chen Q, et al. Coronary artery calcium score quantification using a deep-learning algorithm[J]. *Clin Radiol*, 2020, 75(3): 211-237.
- [13] Sudre CH, Li W, Vercauteren T, et al. Generalised dice overlap as a deep learning loss function for highly unbalanced segmentations[J]. *Deep Learn Med Image Anal Multimodal Learn Clin Decis Support*, 2017, 2017: 240-248.
- [14] Hoffmann U, Siebert U, Bull-Stewart A, et al. Evidence for lower variability of coronary artery calcium mineral mass measurements by multi-detector computed tomography in a community-based cohort—consequences for progression studies[J]. *Eur J Radiol*, 2006, 57(3): 396-402.
- [15] 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.
- [16] Huang YL, Wu FZ, Wang YC, et al. Reliable categorisation of visual scoring of coronary artery calcification on low-dose CT for lung cancer screening: validation with the standard Agatston score[J]. *Eur Radiol*, 2013, 23(5): 1226-1233.
- [17] Chen Y, Hu Z, Li M, et al. Comparison of nongated chest CT and dedicated calcium scoring CT for coronary calcium quantification using a 256-detector row CT scanner[J]. *Acad Radiol*, 2019, 26(10): e267-e274.
- [18] Hughes-Austin JM, Dominguez A 3rd, Allison MA, et al. Relationship of coronary calcium on standard chest CT scans with mortality[J]. *JACC Cardiovasc imaging*, 2016, 9(2): 152-159.
- [19] 陈杰,孙会利,张焕,等.基于 AI 的胸部 CT 平扫对冠脉钙化积分的准确性评价[J]. *CT 理论与应用研究*, 2021, 30(2): 234-242.

(收稿日期:2022-05-06 修回日期:2022-11-05)