

机器学习对不同性质斑块致冠状动脉狭窄程度初步评估的价值

张稟评¹ 梁洋洋² 刘顺利¹ 徐凤磊¹ 钟鑫¹ 李志明¹

(1 青岛大学附属医院放射科, 山东 青岛 266003; 2 北京深睿博联科技有限责任公司)

[摘要] **目的** 探讨机器学习对不同性质斑块致冠状动脉狭窄程度初步评估的价值。**方法** 选择 2020 年 1 月—2022 年 10 月于我院行冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)并在随后 14 d 内行冠状动脉造影(CAG)的患者 80 例, 随机选取 80 例患者 CCTA 中 103 处冠状动脉狭窄位置, 根据斑块性质分为钙化斑块组(38 处)、非钙化斑块组(34 处)和混合斑块组(31 处)。分别采用主观评估(SA)法、后处理工作站测量(AW)法、人工智能(AI)法、人工与 AI 结合(Semi-AI)法评估各组斑块所致冠状动脉狭窄程度。以 CAG 结果为诊断冠状动脉狭窄程度的金标准, 比较上述四种方法与金标准的符合率、低估率及高估率。**结果** 四种方法中, AI 法评估三种斑块的符合率、低估率、高估率与 SA 法比较均无显著差异($P>0.0083$)。在非钙化斑块和混合斑块的评估中, AI 法的符合率显著高于 AW 法和 Semi-AI 法($\chi^2=7.65\sim 16.20, P<0.0083$); 在钙化斑块的评估中, AI 法的符合率与其他三种方法相比无统计学差异($P>0.05$); 在钙化斑块及混合斑块的评估中, Semi-AI 法比其他三种方法的高估率显著降低($\chi^2=8.77\sim 23.62, P<0.0083$)。**结论** AI 法在一定程度上可取代影像科医师对不同性质斑块所致冠状动脉狭窄程度的主观评估, 对于冠脉狭窄的评估流程具有优化作用, Semi-AI 法则可改善对各种性质斑块所致冠脉狭窄的高估的情况。但目前上述方法仅能对冠状动脉狭窄程度进行初步评估, 均无法作为金标准取代 CAG 法。

[关键词] 人工智能; 机器学习; 计算机体层摄影血管造影术; 冠状动脉狭窄; 斑块, 动脉粥样硬化

[中图分类号] R319; R543.3

[文献标志码] A

Value of machine learning in preliminary assessment of the degree of coronary artery stenosis caused by different types of plaques

ZHANG Bingping, LIANG Yangyang, LIU Shunli, XU Fenglei, ZHONG Xin, LI Zhiming (Department of Radiology, The Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao 266003, China)

[ABSTRACT] **Objective** To explore the application value of machine learning in preliminary evaluation of the degree of coronary artery stenosis caused by different types of plaques. **Methods** Eighty patients who underwent coronary CT angiography (CCTA) and coronary angiography (CAG) in the following 14 d from January 2020 to October 2022 were selected. During CCTA, 103 coronary artery stenosis sites were randomly selected and divided into calcified plaque group (38 sites), non-calcified plaque group (34 sites), and mixed plaque group (31 sites) according to plaque properties. Subjective evaluation (SA), post-processing workstation measurement (AW), artificial intelligence (AI), and SA combined with AI (Semi-AI) were used to assess the degree of coronary artery stenosis caused by plaques in each group. CAG results were used as the gold standard for the degree of coronary artery stenosis. The coincidence, underestimation, and overestimation rates were calculated based on the gold standard and compared between the four methods. **Results** Among the four methods, there were no significant differences in the coincidence rate, underestimation rate, and overestimation rate between AI and SA ($P>0.0083$). In the evaluation of non-calcified plaque and mixed plaque, the coincidence rate of AI was significantly higher than those of AW and Semi-AI ($\chi^2=7.65-16.20, P<0.0083$). In the evaluation of calcified plaque, the coincidence rate of AI was not significantly different from those of the other three methods ($P>0.05$). In the evaluation of calcified plaque and mixed plaque, the overestimation rate of Semi-AI was significantly lower than those of the other three methods ($\chi^2=8.77-23.62, P<0.0083$). **Conclusion** AI can partly replace the subjective evaluation made by radiologists regarding coronary artery stenosis caused by different types of plaques, thus optimizing the evaluation process of coronary artery stenosis. The Semi-AI method can reduce the overestimation of coronary artery stenosis caused by various types of plaques. However, AI cannot be used as a gold standard, and can only be used to preliminarily evaluate the degree of coronary artery stenosis.

[KEY WORDS] Artificial intelligence; Machine learning; Computed tomography angiography; Coronary stenosis; Plaque, atherosclerotic

冠状动脉(简称冠脉)疾病已经成为威胁我国民

众健康的重大疾病之一,《2019 年中国心血管疾病的流行病学调查》和《中国心血管健康与疾病报告 2022 要点解读》指出心血管疾病是国人的主要死亡病因^[1-2]。冠脉 CT 血管造影(CCTA)是评估冠脉

[收稿日期] 2024-01-27; **[修订日期]** 2024-03-12

[基金项目] 山东省智能社会治理研究课题项目(2023GZSZ-

107)

[通讯作者] 李志明, Email: lizhiming@qdu.edu.cn

病变的重要影像学检查方法,具有操作简单、创伤小等优点^[3]。目前研究显示,CCTA 对于非钙化斑块的评估无明显高估与低估的情况,但钙化斑块所致血管狭窄程度往往有被高估的情况,而对混合斑块评估的准确率介于钙化与非钙化斑块之间^[4]。近年来,科技飞速发展使得人工智能(AI)技术的应用范围不断扩大,AI 在医疗领域的使用频率也迅速增加^[5-7]。KANG 等^[8]首次提出了基于机器学习的冠脉狭窄自动检查方法,目前基于 AI 的 CCTA 技术还处于起步发展时期^[9-10],既往也有研究比较了主观评估(SA)法与 AI 法评估斑块所致冠脉狭窄的准确性^[11-12],但上述研究未将斑块性质进行细化,且现有研究对于 AI 评估冠脉狭窄的低估率、高估率报道较少。本研究通过将 SA 法、后处理工作站测量(AW)法、AI 法、人工与 AI 结合(Semi-AI)法用于钙化、非钙化及混合斑块所致冠脉狭窄程度的评估,比较四种方法与冠脉狭窄程度诊断金标准冠脉造影(CAG)结果的符合率、低估率及高估率,分析基于 AI 的机器学习对不同性质斑块所致冠脉狭窄程度初步评估的价值。

1 对象与方法

1.1 研究对象

选择 2020 年 1 月—2022 年 10 月于我院进行 CCTA 并诊断有斑块狭窄患者 80 例,其中男 46 例,女 34 例;年龄 34~79 岁,平均(62.99±9.19)岁。患者纳入标准:①CCTA 检查后 14 d 内行 CAG 检查者;②CCTA 图像质量佳,无明显呼吸和运动伪影者;③责任冠脉正常处管腔直径>1.5 mm^[13-14]者;④CCTA 扫描时心率低于 90 次/min 者。排除标准:①碘对比剂过敏者;②先天性冠脉解剖异常或已行血运重建者;③孕妇或哺乳期妇女。随机选取 80 例患者 CCTA 示冠脉狭窄的位置 103 处,据斑块性质(CT 值)^[13]分为钙化斑块组(38 处)、非钙化斑块组(34 处)和混合斑块组(31 处)。

1.2 研究方法

1.2.1 SA 法 由 2 名影像科医师分别独立在影像归档和通信系统上观察 CCTA 图像中冠脉狭窄处,窗宽和窗位初始设置为 800、300 Hu^[15],采用曲面重组(CPR)、容积再现(VR)等方式测量病变处狭窄程度。当两位医生结果不一致时通过协商讨论取得最终值。

1.2.2 AW 法 由 1 名影像科医师使用 AW 4.6 后处理工作站测量评估冠脉狭窄的程度,首先观察

CCTA 图像中 CPR 的血管路径是否一致(若不一致进行修正),在血管横截面处依据 CT 值自动勾画出狭窄处残存血管边缘,记录狭窄处残存管腔平均直径并计算病变处狭窄程度^[16]。

1.2.3 AI 法 使用冠脉 CT 影像辅助诊断软件(深睿 DW-CAADS)在 CCTA 图像中自动评估冠脉狭窄程度。

1.2.4 Semi-AI 法 由 1 名影像科医师使用深睿 DW-CAADS 手动选取 CCTA 图像中冠脉狭窄处,利用公式^[16]计算血管狭窄程度。

1.2.5 符合率、低估率和高估率计算 根据《国际心血管 CT 协会 CCTA 解释和报告指南》^[15]将血管狭窄分为正常、轻微狭窄、轻度狭窄、中度狭窄、重度狭窄和闭塞六种程度。分别采用上述四种方法评估各组斑块所致的冠脉管腔狭窄程度,若 CCTA 评估结果与 CAG 诊断结果同属一种狭窄程度则计为符合,若 CCTA 评估的狭窄程度低于 CAG 计为低估,反之计为高估。计算并比较四种方法与 CAG 诊断结果的符合率、低估率和高估率,公式为:符合率=同种性质斑块符合 CAG 诊断狭窄程度例数/同种性质斑块总数×100%,低估率=同种性质斑块较 CAG 诊断狭窄程度低估例数/同种性质斑块总数×100%,高估率=同种性质斑块较 CAG 诊断狭窄程度高估例数/同种性质斑块总数×100%。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 27.0 软件进行统计分析,计数资料以例(率)表示,多组间比较采用 χ^2 检验,两两比较采用 Bonferroni 检验。 χ^2 检验以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义,Bonferroni 校正以 $P < 0.008 3$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 四种方法评估钙化斑块的低估率、符合率及高估率比较

χ^2 检验及 Bonferroni 检验结果显示,四种方法评估钙化斑块的低估率、高估率差异均具有显著性($\chi^2 = 13.55, 25.38, P < 0.05$),但符合率比较无显著差异($P > 0.05$);Semi-AI 法的低估率显著高于其他三种方法,高估率则显著低于其他三种方法($\chi^2 = 8.77 \sim 23.62, P < 0.008 3$);AI 法与 SA 法的低估率、高估率均无明显差异($P > 0.008 3$)。见表 1。

2.2 四种方法评估非钙化斑块的低估率、符合率及高估率比较

χ^2 检验及 Bonferroni 检验结果显示,四种方法

评估非钙化斑块的符合率、低估率差异均有显著性 ($\chi^2 = 14.25, 23.78, P < 0.05$), 但高估率比较无显著差异 ($P > 0.05$); 与 AI 法相比, SA 法的符合率、低估率均无显著差异 ($P > 0.0083$), AW 及 Semi-AI 法的低估率显著增高、符合率显著降低 ($\chi^2 = 7.65 \sim 17.75, P < 0.0083$)。见表 2。

2.3 四种方法评估混合斑块的低估率、符合率及高估率比较

χ^2 检验及 Bonferroni 检验结果显示, 四种方法评估混合斑块的符合率、低估率及高估率差异均有显著性 ($\chi^2 = 9.5 \sim 45.18, P < 0.05$); 与 AI 法相比, SA 法的符合率、低估率、高估率均无显著差异 ($P > 0.0083$), AW 以及 Semi-AI 法低估率显著增高、符合率显著降低, 并且 Semi-AI 法的高估率显著降低 ($\chi^2 = 8.95 \sim 28.93, P < 0.0083$)。见表 3。

表 1 四种方法评估钙化斑块狭窄的低估率、符合率及高估率比较 [$n = 38$, 例 ($\chi / \%$)]

指标	SA 法	AW 法	AI 法	Semi-AI 法
低估率	1 (2.6)	3 (7.9)	2 (5.3)	11 (28.9)
符合率	10 (26.3)	17 (44.7)	14 (36.8)	21 (55.3)
高估率	27 (71.1)	18 (47.4)	22 (57.9)	6 (15.8)

表 2 四种方法评估非钙化斑块狭窄的低估率、符合率及高估率比较 [$n = 34$, 例 ($\chi / \%$)]

指标	SA 法	AW 法	AI 法	Semi-AI 法
低估率	15 (44.1)	25 (73.5)	12 (35.3)	29 (85.3)
符合率	13 (38.2)	7 (20.6)	18 (52.9)	5 (14.7)
高估率	6 (17.6)	2 (5.9)	4 (11.8)	0 (0)

表 3 四种方法评估混合斑块狭窄的低估率、符合率及高估率比较 [$n = 31$, 例 ($\chi / \%$)]

指标	SA 法	AW 法	AI 法	Semi-AI 法
低估率	4 (12.9)	19 (61.3)	3 (9.7)	24 (77.4)
符合率	18 (58.1)	3 (9.7)	18 (58.1)	6 (19.4)
高估率	9 (29.0)	9 (29.0)	10 (32.3)	1 (3.2)

3 讨 论

本研究应用传统的 SA 法和 AW 法和基于 AI 的两种全新方法 (AI 法和 Semi-AI 法), 分别对三种不同性质斑块所致冠脉狭窄程度进行符合率、低估率和高估率分析。就四种方法而言, 传统 SA 法需要医师首先初步观察患者冠脉大致走行, 再对可疑病变部位进行最大密度投影、多层面重组及 CPR、VR 等处理, 并进一步主观评估其狭窄程度^[17], 其过程费时费力且影响了干预决策的时效性, 且 SA 法

存在着主观性及专业性对结果影响较大等弊端。LIU 等^[18] 统计得出影像诊断医师对于 CCTA 图像判读及报告书写的时间为 13~18 min, 刘春雨等^[12] 研究发现, 诊断医师判读 CCTA 图像的时间约为 8.5 min, AI 辅助判读 CCTA 的时间约为 1.9 min, 相较于人工时间缩短约 77%。本研究结果显示, AI 法评估三种不同性质斑块所致冠脉狭窄的符合率、低估率以及高估率与 SA 法无显著差异。张晓浩等^[19] 和 KANG 等^[8] 研究也显示, SA 法与 AI 法在判读狭窄程度 $\geq 50\%$ 的冠脉狭窄时, 两种方法与金标准 CAG 相比符合率无显著差异。

本研究四种方法评估钙化斑块所致冠脉狭窄程度的符合率无显著差异, 但 Semi-AI 法的低估率最高, 体现了 AI 法评估的优势, 在评估单纯钙化斑块所致冠脉狭窄时选择 AI 法更加高效准确。斑块钙化在 CCTA 图像中会表现出两种伪影, 一种是晕状伪影, 其遮盖正常冠状动脉管腔, 另一种是射线硬化伪影, 表现为在钙化后方形成低密度条带^[20], 这两种伪影均易引起对冠脉狭窄程度的高估, 进而影响诊断准确性。本研究中 Semi-AI 法的高估率显著低于其他三种方法, 其机制可能与 Semi-AI 法通过图像处理规避了伪影的影响有一定关系。

对于非钙化斑块所致冠脉狭窄程度的评估, 本研究四种方法的高估率无显著差异, 其中 AI 法与 SA 法的低估率及符合率均为最优, 但 Semi-AI 法的低估率升高最显著。临床上冠脉重度狭窄患者分支远端造影剂很少, 传统三维重建软件经常需医师手动重建, 其结果可能很粗糙但为真实结果; 与 AI 法经过大样本深度学习形成的神经网络不同, Semi-AI 法采用图像分割技术自动美化图像, 以获得更好的血管分支及末端细节显示, 在美化图片过程中, Semi-AI 法为获得更好的细节展示可能增宽了原本狭窄的冠脉管腔, 造成了斑块狭窄程度的低估。

对于混合斑块所致冠脉狭窄程度的评估, AI 法与 SA 法的符合率、低估率同样均为最优, 但在高估率评价中, Semi-AI 法显著低于其他三种方法。混合斑块导致的血管狭窄程度易被高估^[20], Semi-AI 法在降低混合斑块中的钙化成分所致狭窄的高估率方面, 相较于其他三种方法具有显著优势。

综上所述, AI 法可更好地辅助影像科医师对不同性质斑块所致冠状动脉狭窄程度进行评估, 对于冠脉狭窄的评估流程具有优化作用, Semi-AI 法则可改善对各种性质斑块所致冠脉狭窄程度高估的情况。但上述方法仅能对冠脉狭窄程度进行初步评

估,均无法作为金标准取代 CAG 法。本研究的局限性在于选取样本时未将冠脉不同分支的狭窄进行细化,也没有比较各种方法对不同分支狭窄程度的评估,后续应增大样本量,对上述变量进行比较。

伦理批准和知情同意:本研究涉及的所有试验均已通过青岛大学附属医院医学伦理委员会的审核批准(文件号 QYFYWZLL27620)。所有试验过程均遵照《人体医学研究的伦理准则》的条例进行。受试对象或其亲属已经签署知情同意书。

作者声明:张稟评、梁洋洋、徐凤磊、钟鑫、李志明参与了研究设计;张稟评、刘顺利、李志明参与了论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意发表该论文,且均声明不存在利益冲突。

[参考文献]

[1] ZHAO D, LIU J, WANG M, et al. Epidemiology of cardiovascular disease in China: Current features and implications [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2019,16(4):203-212.

[2] The Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health Diseases in China. 《中国心血管健康与疾病报告 2022》要点解读[J]. *中国心血管杂志*, 2023,28(4):297-312.

[3] 陈静娜,李静静. 64 排螺旋 CT 冠状动脉成像在冠状动脉狭窄诊断中的价值分析[J]. *医学影像学杂志*, 2017,27(12):2414-2417.

[4] 申太忠,谢灵争,李宝,等. CTA 检查判断冠脉管腔狭窄程度受斑块性质影响的研究[J]. *中外医学研究*, 2022,20(7):71-74.

[5] 游德淑. 冠状动脉 CT 血管成像在冠状动脉功能性狭窄中的研究进展[J]. *实用放射学杂志*, 2023,39(2):321-324.

[6] 尹伟,王敏杰,徐瑞敏,等. 基于人工智能的辅助运动校正算法对 CCTA 图像质量的影响[J]. *放射学实践*, 2022,37(8):1035-1041.

[7] 史黎炜,邱英鹏,顾柏洋,等. 冠状动脉 CT 血管成像人工智能辅助诊断技术的成本分析[J]. *医学信息学杂志*, 2023,44(10):22-27.

[8] KANG D, DEY D, SLOMKA P J, et al. Structured learning algorithm for detection of nonobstructive and obstructive coronary plaque lesions from computed tomography angiography

[J]. *J Med Imaging*, 2015,2(1):014003.

[9] 门婷婷,龚瑞阳,刘娇,等. 基于人工智能的成像技术在冠心病诊断中的应用[J]. *中国实验诊断学*, 2023,27(8):999-1002.

[10] 唐春香,张龙江. 积极推进人工智能心血管 CT 成像的研发和应用[J]. *国际医学放射学杂志*, 2021,44(5):501-503.

[11] 杨阳,刁楠,黄增发,等. CAD-RADS 在冠心病诊断中的应用:人工智能与人工方法的对照研究[J]. *放射学实践*, 2022,37(4):413-418.

[12] 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.

[13] 中国医师协会放射医师分会. 冠状动脉 CT 血管成像斑块分析和应用中国专家建议[J]. *中华放射学杂志*, 2022,56(6):595-607.

[14] 韩莎莎,程留慧,张卉,等. 人工智能冠状动脉 CT 血管成像在评估冠状动脉狭窄中的应用价值[J]. *临床放射学杂志*, 2024,43(3):456-460.

[15] LEIPSIC J, ABBARA S, ACHENBACH S, et al. SCCT guidelines for the interpretation and reporting of coronary CT angiography: A report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography Guidelines Committee [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2014,8(5):342-358.

[16] 李晓燕,张国明,孙钢,等. 320 排动态容积 CT 与冠脉造影狭窄程度判断差异的因素探讨[J]. *中华医学杂志*, 2013,93(31):2496-2498.

[17] 中华放射学杂志心脏冠状动脉多排 CT 临床应用协作组. 心脏冠状动脉多排 CT 临床应用专家共识[J]. *中华放射学杂志*, 2011,45(1):9-17.

[18] LIU K, HSIEH C, ZHUANG N, et al. Current utilization of cardiac computed tomography in mainland China: A national survey[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2016,10(1):76-81.

[19] 张晓浩,刘军波,范丽娟. 人工智能技术应用于冠状动脉 CTA 图像后处理的可行性[J]. *放射学实践*, 2021,36(8):994-999.

[20] 周立娟,方向明. CCTA 技术对冠状动脉狭窄及其钙化斑块的评估[J]. *国际医学放射学杂志*, 2021,44(1):58-62.

(本文编辑 范睿心 厉建强)

(上接第 129 页)

[15] SINGH S, NAGALAKSHMI D, SHARMA K K, et al. Natural antioxidants for neuroinflammatory disorders and possible involvement of Nrf2 pathway: A review[J]. *Heliyon*, 2021,7(2):e06216.

[16] JURCAU A, SIMION A. Neuroinflammation in cerebral ischemia and ischemia/reperfusion injuries: From pathophysiology to therapeutic strategies[J]. *Int J Mol Sci*, 2021,23(1):14.

[17] LOU J, CAO G X, LI R R, et al. β -caryophyllene attenuates focal cerebral ischemia-reperfusion injury by Nrf2/HO-1 pathway in rats[J]. *Neurochem Res*, 2016,41(6):1291-1304.

[18] CHEN W W, TENG X, DING H M, et al. Nrf2 protects against cerebral ischemia-reperfusion injury by suppressing

programmed necrosis and inflammatory signaling pathways [J]. *Ann Transl Med*, 2022,10(6):285.

[19] LIU H, JING X B, DONG A Q, et al. Overexpression of TIMP3 protects against cardiac ischemia/reperfusion injury by inhibiting myocardial apoptosis through ROS/mapks pathway [J]. *Cell Physiol Biochem*, 2017,44(3):1011-1023.

[20] SAHA S, BUTTARI B, PANIERI E, et al. An overview of Nrf2 signaling pathway and its role in inflammation[J]. *Molecules*, 2020,25(22):5474.

[21] XU Q, CHEUNG R T F. Melatonin mitigates type 1 diabetes-aggravated cerebral ischemia-reperfusion injury through anti-inflammatory and anti-apoptotic effects [J]. *Brain Behav*, 2023,13(9):e3118.

(本文编辑 范睿心 厉建强)