

本文引用: 魏静文, 张兴昆, 吴莹, 等. 颈动脉超声在心血管疾病中的研究进展: 从传统影像到人工智能[J]. 中国动脉硬化杂志, 2026, 34(7): 605-612. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2026.07.002.

[文章编号] 1007-3949(2026)34-07-0605-08

· 专家论坛 ·

颈动脉超声在心血管疾病中的研究进展: 从传统影像到人工智能

魏静文, 张兴昆, 吴莹, 高传玉

阜外华中心血管病医院 河南省冠心病防治重点实验室, 河南省郑州市 450000

[专家简介] 高传玉, 医学博士, 主任医师, 二级教授, 博士研究生导师, 享受国务院政府特殊津贴, 是全国首届“中国好医生”荣誉称号获得者。现任河南省冠心病防治重点实验室主任、河南省心血管病介入诊疗质量控制中心主任、河南省心血管系统疾病质量控制中心主任。兼任中国胸痛中心联盟副主席、河南省胸痛中心联盟主席、中国生物工程学会常务理事、河南省生物工程学会理事长、河南省医学会心血管病学会名誉主任委员, 担任《中华实用诊断和治疗杂志》《中华心力衰竭和心肌病杂志》副总编辑。主要从事冠心病防治及动脉粥样硬化发病机制研究, 先后主持多项国家级及省部级科研项目, 包括国家自然科学基金、国家重点研发计划子课题、省部共建项目等。在国内外重要学术期刊发表论文 150 余篇, 其中 SCI 收录 50 余篇; 获国家科技进步二等奖 1 项、中华医学科技三等奖 1 项、河南省科技进步二等奖 3 项、三等奖 2 项, 主编专著 8 部。



[摘要] 我国心血管疾病的发病率与死亡率持续上升, 严重威胁国民生命健康。已有大量研究证实, 颈动脉超声在心血管疾病的风险预测与诊断中具有重要价值。近年来, 人工智能在超声影像领域发展迅速, 在颈动脉斑块智能识别、易损特征提取及风险评估中展现出良好应用前景。该文通过系统回顾相关文献, 梳理了颈动脉超声从传统影像评价到与人工智能技术融合的研究进展, 围绕颈动脉内膜中膜厚度、斑块负荷与易损特征、血流动力学参数等核心指标, 探讨其与心血管疾病的关联, 同时对人工智能在此领域的应用进展与转化挑战进行了全面梳理与展望, 以期对心血管疾病的早期诊断和干预提供理论依据与前沿支持。

[关键词] 颈动脉超声; 心血管疾病; 动脉粥样硬化; 人工智能; 易损斑块

[中图分类号] R5; R445.1

[文献标识码] A

Research progress of carotid ultrasound in cardiovascular diseases: from traditional imaging to artificial intelligence

Wei Jingwen, Zhang Xingkun, Wu Ying, Gao Chuanyu

Fuwai Central China Cardiovascular Hospital & Henan Key Laboratory of Coronary Heart Disease Prevention and Control, Zhengzhou, Henan 450000, China

[ABSTRACT] The incidence and mortality of cardiovascular diseases (CVD) in China have been continuously rising, posing a serious threat to public health. Extensive studies have demonstrated the important value of carotid ultrasound in the prediction and diagnosis of cardiovascular risks. In recent years, artificial intelligence (AI) has rapidly advanced in the field of ultrasonic imaging, showing great promise in the intelligent identification of carotid plaques, extraction of vulnerable features and assessment of cardiovascular risk. This article systematically reviews the relevant literature to summarize the research progress of carotid ultrasound metrics from traditional imaging to the integration of AI technologies. Focusing on core metrics such as carotid intima-media thickness, plaque burden, vulnerability features, and hemodynamic parameters, it explores the correlation between these indicators and CVD. Furthermore, the review provides a comprehensive outlook on the advances and translational challenges of AI in this field, aiming to provide a theoretical basis

[收稿日期] 2025-12-01

[修回日期] 2026-01-28

[基金项目] 河南省医学科技攻关计划联合共建项目(LHGJ20220101); 河南省重点研发专项(241111312200)

[作者简介] 魏静文, 硕士研究生, 研究实习员, 主要从事冠心病防治及动脉粥样硬化机制研究, E-mail: weijingwen.0307@zzu.edu.cn。通信作者高传玉, 主任医师, 教授, 博士研究生导师, 主要从事冠心病防治及动脉粥样硬化机制研究, E-mail: gao-cy6802@163.com。

and cutting-edge support for the early diagnosis and intervention of CVD.

[KEY WORDS] carotid ultrasound; cardiovascular diseases; atherosclerosis; artificial intelligence; vulnerable plaque

心血管疾病(cardiovascular diseases, CVD)的患病率和死亡率在全球范围内持续攀升,目前已成为我国城乡居民的首要死因。据推算,我国 CVD 现患人数达 3.3 亿,发病分布呈现北方高于南方的特征,且农村地区死亡率多年来持续高于城市。在这一背景下,积极寻找易于推广、可靠便捷的 CVD 风险预警标志物,是当前医疗卫生体系的工作重点^[1]。动脉粥样硬化是 CVD 的主要病理基础,是一种慢性进展性全身性疾病。颈动脉位置浅表,连接心脑血管,在颈部呈“Y”形解剖结构,是动脉粥样硬化的早期好发部位,被视作评估全身动脉粥样硬化的“窗口”,且超声检测安全无创、方便快捷。此外,颈动脉与冠状动脉粥样硬化具有相似的病理基础,近年来大量研究证实,颈动脉超声在冠心病以及 CVD 风险评估中具有重要价值,可为早期识别高危人群、实施干预提供更为直观有效的评估手段^[2-3]。2023 年中国心血管病一级预防指南基层版明确指出,颈动脉粥样硬化是 CVD 风险增强因素^[4]。随着人工智能(artificial intelligence, AI)在医学图像研究领域的飞速发展,AI 与颈动脉超声的交叉融合已成为当前研究热点。本文将从传统影像学出发,系统梳理颈动脉超声在心血管领域的研究进展,以期 CVD 的临床防治提供新的视角与思路。

1 颈动脉超声发展

颈动脉影像学检查是评估动脉粥样硬化的重要手段,包括超声、计算机断层扫描、磁共振成像等技术,图像获取与判读诊断通常由经验丰富的临床医师完成。超声因具备无创、便捷、可实时成像的特点,成为临床首选的筛查工具。常规颈动脉超声检查包括二维灰阶成像、彩色多普勒血流成像及脉冲波频谱多普勒,可获取颈动脉内膜中膜厚度(carotid intima-media thickness, cIMT)及斑块的相关指标,比如大小、位置、回声、形态是否规则等,还可通过实时测量血流动力学参数,辅助评估血管狭窄程度^[5]。随着新兴影像技术的发展,三维超声、超声造影及剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)可量化颈动脉斑块的体积、硬度和斑块内新生血管评分,显著提高超声对斑块易损性的诊断能力,为临床评估 CVD 风险提供更全面的影像支持。

然而,由于不同地区医疗资源分布不均,且超

声成像技术本身存在局限性,传统超声诊断依赖医师经验进行判读,易产生主观偏差。近年来,AI 在医学研究领域飞速发展,主要包括机器学习和深度学习两类技术,能够从超声图像中提取深层次高通量影像特征,挖掘人眼无法观察到的潜在规律与信息,一定程度上弥补了超声技术的局限性。AI 在疾病精准诊断与个体化治疗领域展现出巨大的潜力,为颈动脉斑块的识别与易损性评估提供了智能分析新方法^[6]。下文将结合国内外研究,围绕颈动脉超声的主要评估指标,系统阐述该技术从传统影像学到与 AI 深度融合的发展历程。

2 颈动脉内膜中膜厚度

cIMT 是指血管内膜上缘至外膜上缘的垂直距离,即血管壁内膜与中膜的总厚度,是超声评估动脉粥样硬化性病变最直观的指标之一(图 1)。但 cIMT 的测量部位目前仍存在争议,美国心脏病学会指出,测量缺乏标准化,是限制 cIMT 在临床实践中用于 CVD 风险评估的主要问题^[7]。目前多数研究倾向于在颈总动脉测量 cIMT,该区域的成像更具稳定性与可重复性。我国最新专家共识明确并统一了 cIMT 的标准测量部位,推荐采用纵断面与横断面联合的扫查模式,要求避开斑块,在颈总动脉分叉远端 1.0~1.5 cm 处测量 cIMT,并明确将 1.0 mm $\leq$ cIMT < 1.5 mm 判定为 IMT 增厚^[8]。cIMT 增厚是动脉粥样硬化早期病变和血管重塑的标志,相比传统危险因素及临床生物化学指标,它能够更直观地反映血管壁病变,有助于 CVD 的风险预测与疾病进展监测。Willeit 等^[9]对 119 项随机对照试验共 100 667 例受试者开展荟萃分析,结果发现,治疗干预对 cIMT 进展的延缓作用与 CVD 风险降低呈正相关。该研究平均随访 3.7 年,共发生 12 038 例 CVD 终点事件;在所有干预措施中, cIMT 年进展每降低 10 μ m, CVD 风险可降低约 9%,这为将 cIMT 进展作为临床 CVD 风险的替代标志物提供了有力依据。

然而, cIMT 对 CVD 的预测价值目前仍存在争议。动脉粥样硬化病变主要发生于内膜,而中膜厚度占 cIMT 的 80%,因此即便已经出现动脉粥样硬化, cIMT 的整体变化幅度仍然较小,其检测敏感度相对受限。已有研究^[10]发现,在 2 型糖尿病患者中,单纯颈动脉内膜厚度对冠状动脉钙化的预测价

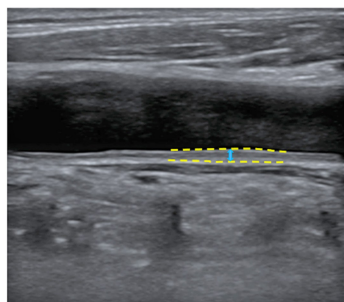


图 1. cIMT 超声灰阶图像
黄色虚线标示出测量的上、下边界,两条虚线之间的垂直距离即为 cIMT。

Figure 1. cIMT ultrasound grayscale image

值优于 cIMT。此外,研究人群的基线特征,尤其是年龄结构,可能是导致不同研究结论存在差异的另一关键因素。Yeboah 等^[11]研究发现,在传统危险因素的基础上加入 cIMT,并未显著提升一般人群心血管事件风险的预测能力。不过国内一项最新大规模研究纳入了近 37 万名 35 ~ 75 岁无 CVD 病史的社区居民,其中有 4 723 例(1.28%)受试者在中位随访 4.7 年期间发生心血管死亡事件。整体分析并未发现 cIMT 平均值和最大值与心血管死亡存在显著关联,但进一步开展年龄亚组分析后发现,cIMT 可提升 55 岁以下人群心血管死亡的预测能力:其中 cIMT 平均值的净重新分类改善指数从 35 ~ 44 岁年龄组的 22.60% (95% CI: 15.56% ~ 29.64%) 降至 65 ~ 75 岁年龄组的 7.00% (95% CI: -6.82% ~ 20.83%),cIMT 最大值也得到了类似结果。如果不进行年龄分层,cIMT 在年轻人群中的预测价值可能会被掩盖,这一结果对制定中青年群体的个体化 CVD 预防策略具有重要指导意义^[12]。其次,cIMT 测量缺乏统一标准是导致不同研究结论存在异质性的核心原因,目前欧洲和美国心脏病学会指南均不推荐将 cIMT 指标纳入常规 CVD 风险评估,未来仍需更多研究推动 cIMT 测量定义的标准化,以进一步明确其在 CVD 风险个体化评估中的临床价值^[13-14]。

3 颈动脉斑块

越来越多的研究表明,在心血管事件的风险预测与诊断中,颈动脉斑块是优于 cIMT 的更强预测指标^[15-16]。2021 年欧洲心脏病学会将颈动脉斑块与冠状动脉钙化评分一同列为心血管风险评估的 III 类推荐风险修正因子^[14]。目前国内外颈动脉超声指南普遍采用曼海姆共识提出的斑块定义标

准^[17],即 $cIMT \geq 1.5 \text{ mm}$,或较周边 cIMT 增厚 $\geq 0.5 \text{ mm}$,或超出周边 cIMT 的 50% 以上,同时凸向管腔的局部结构改变;指南推荐颈动脉斑块扫查采用纵断面与横断面结合的方式,纵断面用于测量斑块长度,横断面用于测量斑块厚度(图 2)。这一标准化定义有助于推动数据的同质化收集与整合,为大规模临床研究的荟萃分析提供基础。随着影像学技术的不断发展,近期研究发现,在 CVD 的病情评估中,颈动脉斑块易损性特征的价值比斑块负荷更为重要^[18]。下文将分别阐述斑块负荷与易损性在 CVD 中的研究及应用进展。

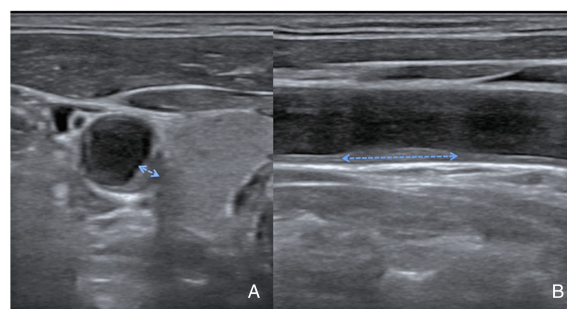


图 2. 颈动脉斑块大小测量的超声图像

A:横切面测量颈动脉斑块最大厚度;
B:纵切面测量颈动脉斑块长度。

Figure 2. Ultrasound images for measuring the size of carotid plaques

3.1 斑块负荷

颈动脉斑块负荷是评估心血管风险的重要指标,已有研究证实,颈动脉斑块的存在和数量与心血管事件的发生密切相关。其中,颈动脉最大斑块厚度是研究起步较早、应用也较为广泛的评估指标之一。Sillesen 等^[19]针对 5 808 名无症状成年人开展的前瞻性研究显示,3 年随访期间,颈动脉最大斑块厚度与主要不良心血管事件(major adverse cardiovascular events, MACE)发生率呈显著正相关,可作为预测 CVD 风险的有效指标。但斑块厚度本身变化范围较小,相比之下,斑块长度和面积增长速度更快、动态范围更大,更便于临床观察。Tang 等^[20]研究发现,相较于平均 cIMT 与单纯斑块评估,颈动脉最大斑块长度在预测冠心病的发生及严重程度方面,具有更优的独立预测价值与增量价值。另有研究指出,颈动脉斑块总面积可能是更敏感的评估指标,该指标与无症状人群的冠状动脉钙化程度密切相关,还可提升对冠心病事件的预测能力,这一优势在女性人群中更为突出^[21]。随着三维超声技术的发展,它可在空间维度获取斑块的形态与体

积,克服了二维成像的局限性,能够更准确地反映斑块负荷。韩莹等^[22]研究发现,糖尿病合并冠心病患者的颈动脉斑块体积显著大于非冠心病组;与斑块厚度和面积相比,斑块体积是预测糖尿病患者冠心病风险的更强有效指标。但受检查成本较高、检查耗时久、测量技术复杂等因素限制,目前斑块体积尚未在临床得到广泛应用。

基于斑块负荷指标,研究者已发展出多种积分评估方法。例如,Crouse 评分通过计算双侧颈动脉所有斑块的厚度总和,反映整体斑块负荷水平。Tada 等^[23]指出,Crouse 评分可作为动脉粥样硬化性心血管疾病患者不良预后的有效预测指标,将其与传统心血管危险因素结合,可进一步提升风险预测的准确性。但 Crouse 积分的测量与计算过程相对复杂且耗时,Matangi 等^[24]采用的 Rotterdam 方法依据斑块的部位分布计算斑块评分,操作更加简便快捷;该研究发现 Rotterdam 斑块评分与低中危患者未来 10 年 MACE 风险呈显著正相关,其中斑块评分 ≥ 2 的患者发生 MACE 的调整后风险比为 2.05,为临床开展精准风险分层提供了重要依据。这些发现凸显了颈动脉斑块负荷在心血管风险评估中的价值。

3.2 易损斑块

易损斑块被定义为所有具有破裂倾向、易形成血栓和/或进展迅速的危险斑块^[25],其特征包括回声异质性、表面不规则、钙化、纤维帽变薄、富含脂质的坏死核心(lipid-rich necrotic core, LRNC)及新生血管形成,与心血管事件的发生密切相关。Tobe 等^[26]分析了 691 名经皮冠状动脉介入治疗的患者颈动脉斑块易损特征与 MACE 的相关性,结果显示,存在斑块回声异质性、不规则或钙化特征的患者,MACE 发生风险更高。在多因素调整后,异质性斑块仍与 MACE 独立相关,风险比为 1.71。异质性斑块在超声图像中表现为回声不均匀,通常提示斑块内存在脂质核心、钙化或出血等复杂成分,这些特征使其更易发生破裂,从而增加心脑血管事件风险^[27]。Liu 等^[28]研究了颈动脉超声特征在预测基于光学相干断层扫描定义的冠状动脉易损斑块中的临床价值,发现颈动脉斑块纤维帽不规则($OR = 4.819, 95\% CI: 1.106 \sim 22.867$)和低回声特征($OR = 9.632, 95\% CI: 2.138 \sim 43.384$)是冠状动脉易损斑块的独立预测因子。

传统超声在识别颈动脉斑块、监测血流动力学方面的确有很大帮助,但对斑块内部结构及稳定性的判断能力仍然有限,这也推动了 SWE 及超声造影

等新兴技术的应用。SWE 可定量检测颈动脉斑块的弹性模量与硬度,朱珊等^[29]研究表明,颈动脉斑块弹性模量与冠状动脉狭窄程度呈负相关;斑块弹性较低通常提示存在大量脂质核心伴明显炎症细胞浸润,斑块易损性相对更高,对应的临床风险也随之增加。超声造影通过增强血液与组织的回声对比,可有效识别斑块内新生血管,从而更准确地评估斑块易损性^[30]。Liu 等^[31]通过超声造影发现,颈动脉斑块内新生血管密度与冠状动脉斑块易损性显著相关。目前已证实,斑块内新生血管生成在调控斑块稳定性中发挥重要作用,可进一步诱发炎症细胞浸润和斑块内出血,增加斑块破裂风险。Mantella 等^[32]也得到了类似结论,研究显示颈动脉斑块内新生血管评分与冠状动脉狭窄程度呈正相关,可用于预测冠心病患者发生 CVD 的风险。由此可见,颈动脉斑块的易损特征不仅是 CVD 风险的强力预测因子,还有助于临床医生制定更具个性化的治疗与干预方案。

尽管颈动脉斑块的形态特征已经得到国内外学者的广泛认同,但目前针对斑块易损特征的解读与报告仍缺乏统一的标准化评估体系。这一局面随着 2024 年颈动脉斑块报告和数据系统(plaque-reporting and data system, Plaque-RADS)的提出得到改观^[33](图 3 和表 1)。多国专家联合构建了结构化分级评估框架,为斑块成分与形态学特征给出了统一的影像学定义与诊断标准。该系统融合了超声、计算机断层扫描和磁共振成像三种多模态影像技术,对颈总动脉及其分支血管进行独立、规范的评估,将复杂的影像学特征转化为清晰直观的等级化结构报告。Plaque-RADS 有助于临床医生全面、客观地评估斑块稳定性,识别出可能从治疗中获益,或需接受替代治疗的人群。国内研究显示,该系统可显著提升临床对卒中的分级诊断能力,对轻中度狭窄患者的诊断尤其具有优势^[34]。未来还需更多研究进一步探索证实该系统对 CVD 的风险预测价值,为临床开展对症防治提供更可靠的影像学依据。

4 颈动脉血流动力学参数

颈动脉血流动力学参数通常与 cIMT 和斑块同步测量,通过颈动脉多普勒血流频谱可获取收缩期峰值流速(peak systolic velocity, PSV)、舒张末期流速(end diastolic velocity, EDV)、阻力指数(resistent index, RI)及搏动指数(pulsatility index, PI)等参数。PSV 反映血管狭窄处的最大血流速度,与管腔狭窄

表 1. 基于影像学特征的 Plaque-RADS 分类

Table 1. Plaque-RADS classification based on imaging features

Plaque-RADS 分类	影像学特征
1	正常血管壁
2	最大管壁厚度 <3 mm
3	最大管壁厚度 ≥3 mm 或愈合的溃疡斑块
3a	LRNC 伴厚纤维帽 (最大管壁厚度 ≥3 mm)
3b	LRNC 伴薄纤维帽 (最大管壁厚度 ≥3 mm)
3c	愈合的溃疡斑块
4	复杂斑块 (不论最大管壁厚度)
4a	斑块内出血
4b	纤维帽破裂
4c	管腔内血栓

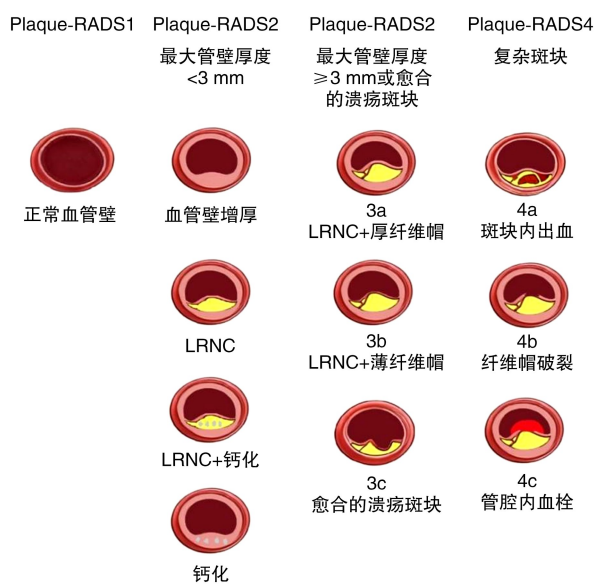


图 3. Plaque-RADS 系统斑块分类示意图

Figure 3. Schematic diagram of plaque classification under Plaque-RADS system

程度呈正相关;EDV 代表舒张期血管内的最小血流速度,其降低通常提示血管远端血流受损或功能障碍;RI 反映远端血管的阻力状况,PI 则反映血管的顺应性与弹性状态。这些参数的动态变化与血管狭窄程度、斑块稳定性密切相关。近年来随着超声技术及分析方法的进步,血流动力学参数在 CVD 临床风险评估中的应用价值日益凸显。

Chuang 等^[35] 基于 CVDFACTS 乡镇社区研究,纳入 3 146 名健康成年人,开展中位时间为 12.8 年的随访后发现,颈总动脉低 EDV (<15 cm/s) 与低 PSV (<65 cm/s) 均与未来发生 CVD 事件的风险显著相关,其中 EDV 对传统风险因素模型具有增量预

测价值,建议将其纳入 CVD 风险评估体系。另有一项研究^[36] 也得到了类似结论:即便校正传统危险因素、cIMT 及颈动脉斑块所有变量后,颈总动脉平均 EDV 仍与 CVD 风险呈独立相关。Wu 等^[37] 对比了冠心病患者与对照者的颈总动脉血流动力学参数,结果显示,冠心病患者的颈动脉血流速度显著降低,RI 和 PI 则明显升高;且与左侧相比,右侧颈总动脉的平均血流速度对疾病的预测效能更优。从血流动力学与分子生物学角度分析,潜在机制可能为:颈动脉血流速度降低会导致剪切应力减少,进而诱导内皮细胞功能障碍与重编程,促进动脉粥样硬化斑块的形成、进展及破裂,最终增加 CVD 的发生风险^[38]。未来研究可进一步结合高通量多组学技术,从系统生物学层面阐明颈动脉血流动力学与 CVD 风险之间的病理机制,为相关临床转化提供更全面的理论依据。

5 人工智能

临床上,颈动脉超声检查的 cIMT 和斑块测量通常由经验丰富的超声医师手动完成,存在主观性强、重复性与精确度较差等问题。AI 技术的快速发展推动了医学图像智能分析逐步向临床实践转化,目前该技术已广泛应用于颈动脉超声图像处理中,可实现 cIMT 自动测量,以及斑块自动分割、识别与诊断,辅助临床对斑块稳定性做出更客观准确的评估。早期研究多采用机器学习方法进行图像分割,通常需要依赖复杂算法或人工轮廓勾画,准确率不高。近年来,基于深度学习的自动分割方法逐渐成为主流,这类方法无需手动选取感兴趣区域,即可完成颈动脉图像的自动分割。Huang 等^[39] 提出了一种嵌套注意力引导的深度学习模型 NAG-Net,可精准分割颈动脉管腔内膜界面与管壁外膜界面,以此实现 cIMT 的自动测量;该模型的图像分割评价指标 JSC、DSC、ACC 分别达到 81.69%、89.92%、90.31%,且无需复杂的后处理步骤。赫兰等^[40] 采用来自两家医院的 1 761 张超声图像数据集,构建了单输入双线性卷积神经网络与残差神经网络融合的深度学习模型 (BCNN-ResNet),可自动识别不同超声设备图像中是否存在颈动脉斑块。内部验证结果显示,该模型准确率达 95.97%,曲线下面积 (area under the curve, AUC) 为 0.99,性能优于 AUC 为 0.98 的 Resnet-34 网络模型。与静态图像相比,基于动态超声视频序列完成颈动脉斑块的自动识别,更有助于提升诊断的效率、即时性和准确性。

国内一项研究^[41]基于单中心多设备采集的 445 段颈动脉超声视频数据集,采用 YOLOv4 框架开发出颈动脉斑块自动识别系统 BETU。该系统在实时超声视频中表现出良好的诊断性能,识别准确率达 98.5%,与临床医师人工评估结果高度一致($Kappa = 0.967, P < 0.001$)。

既往研究表明,颈动脉斑块的易损特征与冠状动脉事件和卒中风险密切相关,准确评估斑块稳定性对心脑血管事件的风险预测及治疗策略制定至关重要。Gan 等^[42]基于单中心包含 1 270 例颈动脉超声图像的数据集,提出一种端到端半监督多任务学习网络(SML-Net),该网络可同时完成斑块分割与分类任务,斑块分类准确率达 86.59%,骰子相似系数(dice similarity coefficient, DSC)为 82.36%。He 等^[43]采用基于深度学习的 BCNN-ResNet 模型自动识别斑块稳定性,该模型在内部测试中的分类准确率达 98.9%,在另一独立中心的外部验证中准确率仍可达 95.1%。由此可见,颈动脉超声与 AI 技术的结合为临床提供了更精准的风险分层工具,进一步提升了该方法在心脑血管疾病风险预测中的潜力与诊断准确性。

目前,医学影像 AI 的临床应用仍面临诸多挑战。首先,医学影像 AI 研究对数据质量要求极高,但当前数据与标注不统一、缺乏统一标准,在很大程度上制约了 AI 模型的可靠性与泛化能力。其次,现有研究多基于单中心小样本数据库,不同医学影像设备与算法之间的差异限制了模型的普适性,导致多数 AI 模型在独立外部验证或临床实际应用中表现不稳定。最后,医学影像 AI 模型缺乏足够的生物学解释性也是不容忽视的挑战——模型未能充分揭示其决策背后的病理机制,这直接影响了医师和患者对 AI 辅助结果的理解与信任^[44]。未来需着力构建高质量标准化数据库、发展可解释 AI 模型,通过多中心大样本量临床研究验证其效能与安全性,共同推动医学影像 AI 实现从技术到临床的真正跨越。

6 结 语

综上所述,得益于影像学与 AI 技术的持续革新,颈动脉超声已在 CVD 风险评估、早期识别及预后判别等领域取得重要进展,为临床制定精准化诊疗方案提供了有力依据。但现有研究仍存在较大局限性:首先需积极建立基于多中心共识的颈动脉超声图像标准化采集、测量与报告体系,依托大规

模高质量数据库,提升颈动脉超声在 CVD 个体化风险评估中的普适性与临床价值;其次,现有研究多局限于单一影像学指标,今后应构建融合多模态影像的综合性评估体系,结合临床危险因素建立性能更优异的 CVD 预测模型;此外,AI 医学影像的数据标准化与临床实际场景应用仍面临巨大挑战,亟需制定统一的数据采集与处理规范。未来应依托多中心协作与数据共享平台开展大规模前瞻性队列研究,进一步推动 AI 与单细胞转录组学、蛋白组学等多学科交叉融合,通过增强模型可解释性逐步破解“黑匣子”难题,构建更精准的 CVD 风险预测模型,提升临床决策的科学性与可信度。

[参考文献]

- [1] 国家心血管病中心,中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2023 概要[J]. 中国循环杂志, 2024, 39(7): 625-660.
National Center for Cardiovascular Diseases, the Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Report on cardiovascular health and diseases in China 2023: an updated summary [J]. Chin Circ J, 2024, 39(7): 625-660.
- [2] 郭兴, 李金生, 王星. 超声评价中老年冠心病患者心外膜脂肪层厚度与颈动脉血管弹性的相关性[J]. 中国动脉硬化杂志, 2023, 31(9): 785-790.
Guo X, Li J S, Wang X. The correlation between epicardial adipose thickness and elasticity of carotid artery in middle-aged and elderly patients with coronary heart disease by ultrasonography[J]. Chin J Arterioscler, 2023, 31(9): 785-790.
- [3] Zhu Y, You J, Xu C, et al. Predictive value of carotid artery ultrasonography for the risk of coronary artery disease [J]. J Clin Ultrasound, 2021, 49(3): 218-226.
- [4] 中华医学会心血管病学分会, 中国康复医学会心脏预防与康复专业委员会, 中国老年学和老年医学学会心脏专业委员会, 等. 中国心血管病一级预防指南基层版[J]. 中华心血管病杂志, 2023, 51(4): 343-363.
The Chinese Medical Association's Cardiology Branch, the Chinese Association of Rehabilitation Medicine's Cardiac Prevention and Rehabilitation Committee, and the Chinese Gerontological Society's Cardiology Committee, et al. Chinese guideline on the primary prevention of cardiovascular diseases in primary health care[J]. Chin J Cardiol, 2023, 51(4): 343-363.
- [5] Ottakath N, Al-Maadeed S, Zughaier S M, et al. Ultrasound-based image analysis for predicting carotid artery stenosis risk: a comprehensive review of the problem, techniques, datasets, and future directions [J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(15): 2614.

- [6] Rajpurkar P, Lungren M P. The current and future state of AI interpretation of medical images[J]. *N Engl J Med*, 2023, 388(21): 1981-1990.
- [7] Goff D C J R, Lloyd-Jones D M, Bennett G, et al. 2013 ACC/AHA guideline on the assessment of cardiovascular risk: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2014, 63(25 PtB): 2935-2959.
- [8] 上海市超声质量控制中心. 颈动脉粥样硬化斑块超声规范化操作及报告专家共识(2025, 上海)[J]. *中华医学超声杂志(电子版)*, 2025, 22(6): 504-515.
Shanghai Municipal Ultrasound Quality Control Center. Expert consensus on standardized operation and reporting of carotid ultrasound (2025, Shanghai)[J]. *Chin J Med Ultrasound(Electr Edit)*, 2025, 22(6): 504-515.
- [9] Willeit P, Tschiderer L, Allara E, et al. Carotid intima-media thickness progression as surrogate marker for cardiovascular risk: meta-analysis of 119 clinical trials involving 100 667 patients[J]. *Circulation*, 2020, 142(7): 621-642.
- [10] Martins N S, Barreto J, Kimura-Medorima S T, et al. Carotid intima layer thickness but not intima-media thickness is related to coronary artery calcification in type 2 diabetes individuals: results from the Brazilian diabetes study[J]. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*, 2023, 33(12): 2384-2388.
- [11] Yeboah J, McClelland R L, Polonsky T S, et al. Comparison of novel risk markers for improvement in cardiovascular risk assessment in intermediate-risk individuals [J]. *JAMA*, 2012, 308(8): 788-795.
- [12] Ge J, Jing F, Ji R, et al. Age-related trends in the predictive value of carotid intima-media thickness for cardiovascular death: a prospective population-based cohort study[J]. *J Am Heart Assoc*, 2023, 12(13): e029656.
- [13] Arnett D K, Blumenthal R S, Albert M A, et al. 2019 ACC/AHA guideline on the primary prevention of cardiovascular disease: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines [J]. *Circulation*, 2019, 140(11): e596-e646.
- [14] Visseren F L J, Mach F, Smulders Y M, et al. 2021 ESC guidelines on cardiovascular disease prevention in clinical practice[J]. *Eur Heart J*, 2021, 42(34): 3227-3337.
- [15] Spence J D. Carotid plaque burden is a stronger predictor of cardiovascular risk than IMT[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 80(21): e191.
- [16] Chao C J, Lakshmanan S, Ceponiene I, et al. New carotid plaque, but not the progression of intima-media thickness, predicts the progression of high-risk coronary plaque[J]. *Coron Artery Dis*, 2021, 32(6): 554-560.
- [17] Touboul P J, Hennerici M G, Meairs S, et al. Mannheim carotid intima-media thickness and plaque consensus (2004-2006-2011). An update on behalf of the advisory board of the 3rd, 4th and 5th watching the risk symposia, at the 13th, 15th and 20th European stroke conferences, mannheim, Germany, 2004, Brussels, Belgium, 2006, and Hamburg, Germany, 2011 [J]. *Cerebrovasc Dis*, 2012, 34(4): 290-296.
- [18] 王丽莉, 张皓然, 沈健, 等. 多模态超声联合评估冠心病患者颈动脉斑块易损性的价值[J]. *现代生物医学进展*, 2024, 24(19): 3769-3771, 3740.
Wang L L, Zhang H R, Shen J, et al. The value of multimodal ultrasound combined assessment of carotid artery plaque vulnerability in patients with coronary heart disease [J]. *Prog Mod Biomed*, 2024, 24(19): 3769-3771, 3740.
- [19] Sillesen H, Sartori S, Sandholt B, et al. Carotid plaque thickness and carotid plaque burden predict future cardiovascular events in asymptomatic adult Americans[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(9): 1042-1050.
- [20] Tang W, Shen X, Li H, et al. The independent and incremental value of ultrasound carotid plaque length to predict the presence and severity of coronary artery disease: analysis from the carotid plaque length prospective registry [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2020, 21(4): 389-396.
- [21] Gudmundsson E F, Björnsdóttir G, Sigurdsson S, et al. Carotid plaque is strongly associated with coronary artery calcium and predicts incident coronary heart disease in a population-based cohort[J]. *Atherosclerosis*, 2022, 346: 117-123.
- [22] 韩莹, 敖梦, 王志刚. 颈动脉粥样硬化斑块三维超声参数评估 2 型糖尿病患者冠心病风险[J]. *中国医学影像技术*, 2024, 40(9): 1332-1335.
Han Y, Ao M, Wang Z G. Three-dimensional ultrasound parameters of carotid atherosclerotic plaque for evaluating risk of coronary heart disease in patients with type 2 diabetes mellitus[J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2024, 40(9): 1332-1335.
- [23] Tada H, Nakagawa T, Okada H, et al. Clinical impact of carotid plaque score rather than carotid intima-media thickness on recurrence of atherosclerotic cardiovascular disease events[J]. *J Atheroscler Thromb*, 2020, 27(1): 38-46.
- [24] Matangi M F, Héty M F, Armstrong D W J, et al. Carotid plaque score is associated with 10-year major adverse cardiovascular events in low-intermediate risk patients referred to a general cardiology community clinic [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2025, 26(4): 714-724.
- [25] Naghavi M, Libby P, Falk E, et al. From vulnerable

- plaque to vulnerable patient: a call for new definitions and risk assessment strategies: part I[J]. *Circulation*, 2003, 108(14): 1664-1672.
- [26] Tobe A, Tanaka A, Furusawa K, et al. Heterogeneous carotid plaque predicts cardiovascular events after percutaneous coronary intervention[J]. *J Atheroscler Thromb*, 2023, 30(9): 1187-1197.
- [27] Bos D, Arshi B, Van Den Bouwhuijsen Q J A, et al. Atherosclerotic carotid plaque composition and incident stroke and coronary events[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2021, 77(11): 1426-1435.
- [28] Liu F J, Chen Q, Cheng Y. Noninvasive carotid ultrasound for predicting vulnerable plaques of the coronary artery based on optical coherence tomography images[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2024, 14(1): 316-324.
- [29] 朱珊, 孙楠, 陶宏宇, 等. 剪切波弹性成像评估颈动脉斑块与冠状动脉病变程度的相关性[J]. *中国医学影像学杂志*, 2023, 31(4): 326-331.
- Zhu S, Sun N, Tao H Y, et al. Correlation between carotid plaque and severity of coronary artery lesions via shear wave elastography[J]. *Chin J Med Imaging*, 2023, 31(4): 326-331.
- [30] 齐炳才, 靳琦文, 胡杰, 等. 颈动脉粥样硬化斑块内新生血管的研究现状及进展[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2021, 29(4): 359-362, 368.
- Qi B C, Jin Q W, Hu J, et al. Research status and progress of carotid atherosclerotic intraplaque neovascularization[J]. *Chin J Arterioscler*, 2021, 29(4): 359-362, 368.
- [31] Liu Y, Fu X, Ai X, et al. Carotid intraplaque neovascularization correlates with coronary atherosclerotic plaque, vulnerability detected by intracoronary optical coherence tomography[J]. *Int J Cardiol*, 2025, 437: 133495.
- [32] Mantella L E, Colledanchise K N, Hétu M F, et al. Carotid intraplaque neovascularization predicts coronary artery disease and cardiovascular events[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(11): 1239-1247.
- [33] Saba L, Cau R, Murgia A, et al. Carotid plaque-RADS: a novel stroke risk classification system[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2024, 17(1): 62-75.
- [34] Huang Z, Cheng X Q, Lu R R, et al. Incremental prognostic value of carotid plaque-RADS over stenosis degree in relation to stroke risk[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2025, 18(1): 77-89.
- [35] Chuang S Y, Bai C H, Cheng H M, et al. Common carotid artery end-diastolic velocity is independently associated with future cardiovascular events[J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2016, 23(2): 116-124.
- [36] Chung H, Jung Y H, Kim K H, et al. Carotid artery end-diastolic velocity and future cerebro-cardiovascular events in asymptomatic high risk patients[J]. *Korean Circ J*, 2016, 46(1): 72-78.
- [37] Wu L C, Chou C L, Wu S H, et al. Low carotid mean flow velocity: a noninvasive marker for coronary heart disease: a community-based study[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2025, 15(8): 1005.
- [38] Tamargo I A, Baek K I, Kim Y, et al. Flow-induced reprogramming of endothelial cells in atherosclerosis[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2023, 20(11): 738-753.
- [39] Huang Q, Zhao L, Ren G, et al. NAG-Net: nested attention-guided learning for segmentation of carotid lumen-intima interface and media-adventitia interface[J]. *Comput Biol Med*, 2023, 156: 106718.
- [40] 赫兰, 申锴, 杨泽堃, 等. 基于深度学习的人工智能模型自动识别颈动脉斑块[J]. *中国医疗器械杂志*, 2024, 48(4): 361-366.
- He L, Shen E, Yang Z K, et al. Deep learning-based artificial intelligence model for automatic carotid plaque identification[J]. *Chin J Med Instrument*, 2024, 48(4): 361-366.
- [41] Wei Y, Yang B, Wei L, et al. Real-time carotid plaque recognition from dynamic ultrasound videos based on artificial neural network[J]. *Ultraschall Med*, 2024, 45(5): 493-500.
- [42] Gan H, Liu L, Wang F, et al. SML-Net: semi-supervised multi-task learning network for carotid plaque segmentation and classification[J]. *Comput Med Imaging Graph*, 2025, 124: 102607.
- [43] He L, Yang Z, Wang Y, et al. A deep learning algorithm to identify carotid plaques and assess their stability[J]. *Front Artif Intell*, 2024, 7: 1321884.
- [44] Bi W L, Hosny A, Schabath M B, et al. Artificial intelligence in cancer imaging: Clinical challenges and applications[J]. *CA Cancer J Clin*, 2019, 69(2): 127-157.
- (此文编辑 文玉珊)