

DOI:10.13288/j.11-2166/r.2025.21.011

基于客观化多模态数据融合的冠心病血瘀证诊断模型的构建

丁艳¹, 王烨², 刘佳^{1,2}, 汪南玥^{1,2}✉

1. 中国中医科学院医学实验中心, 北京市东城区东直门内南小街16号, 100700; 2. 中医药防治重大疾病基础研究北京市重点实验室

[摘要] **目的** 通过融合四诊客观化多模态数据, 构建冠心病血瘀证的诊断模型, 以提升中医证候辨识的准确性与客观性。**方法** 纳入冠心病患者426例, 分为血瘀证组221例和非血瘀证组205例。采用不同设备采集冠心病患者的舌象、脉象、声诊信息, 构建冠心病中医客观化四诊数据库; 同时采用临床调查表进行人工信息采集。在单模态分析中, 脉诊数据通过主成分分析(PCA)、最小二乘回归(LS)与套索回归(Lasso)进行判别; 舌诊数据采用卷积神经网络进行分类; 人工信息采集数据采用随机森林进行分类。在多模态建模上, 通过深度学习对冠心病血瘀证人群的脉象、舌象等多源信息以全连接层与问诊进行拼接, 从而实现冠心病血瘀证诊断模型的构建。**结果** 单模态客观化分析显示, 在脉象分析上, 血瘀证组和非血瘀证组的脉诊信息具有显著差异, PCA差异主要在第一主成分上, 判别准确率为99% ($P=0.010$), LS及Lasso分类判别准确率分别为64% ($P=0.360$) 和67% ($P=0.400$), 与非血瘀证组相比, 血瘀证组的时域参数差异主要为左手寸脉力h1降低 ($P=0.018$), 左手关S1/S2 ($P=0.008$) 和右手尺t1 ($P=0.002$) 均升高, 而频域参数差异在左手尺和右手关尤为突出; 舌象分析中, 血瘀证组的舌下络脉平均血管宽度及变异度显著高于非血瘀证组; 人工信息采集数据分析中, 舌下络脉粗张、迂曲、胸痛、胸闷、脉涩、心悸及气短是血瘀证最具鉴别价值的临床特征。此外, 血瘀证组单模态中舌诊辨别准确率最高, 达到83.33% (30/36), 而脉诊、声诊及问诊的辨别准确率均低于舌诊; 最优模态组合(舌诊+脉诊+问诊+声诊)达到最高准确率为86.11% (31/36), 优于单模态模型。**结论** 基于多模态数据融合的诊断模型能有效实现冠心病血瘀证的客观化辨识, 验证了多模态信息融合在提升中医证候辨识准确性方面的优势, 为中医证候诊断的客观化研究提供了科学依据。

[关键词] 冠心病; 血瘀证; 四诊客观化; 多模态数据融合; 诊断模型

冠心病(coronary heart disease, CHD)是因冠状动脉狭窄或阻塞导致心肌缺血、缺氧, 甚至心肌梗死的一种常见心脏疾病。根据《中国心血管健康与疾病报告2023》^[1]统计, 我国现有1139万冠心病患者。中医学将冠心病归属于“胸痹”“心痛”“真心痛”等范畴, 其病位在心, 病机为心脉痹阻, 血瘀证是冠心病最常见的证候之一^[2]。中医药在冠心病的诊治中具有独特优势^[3], 但由于中医四诊在

一定程度上依赖经验和主观判断, 其标准化和客观化存在困难, 影响了中医治疗冠心病诊疗规范的建立与临床应用。

近年来, 随着智能化采集设备的快速发展, 四诊客观化研究在冠心病证候辨识领域取得了显著进展, 如采用声音信号特征支持向量机实现气虚与阴虚、实证与虚证的分类辨识^[4], 以脉象递归定量分析(recurrence quantification analysis, RQA)特征替代其时域特征实现证候诊断的优化^[5], 基于舌诊信息辨识冠心病痰湿证^[6]等, 但目前研究仍为单一诊法的探索, 缺乏多维度信息的系统整合。因此, 本研究采用客观化多模态数据融合策略构建冠

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1707605);科技部科技基础性工作专项(2013FY114400);国家自然科学基金(T2341017);北京市中医药科技发展资金(BJZYQN-2023-03);中医辨证论治智能辅助系统开发与应用(HX2024009)

✉ 通讯作者:184944432@qq.com

心病血瘀证诊断模型,以期提升诊断的准确性与客观性,为中医证候诊断客观化研究提供思路。本研究已经中国中医科学院医学实验中心伦理委员会审查通过(批件号 2018NO. 4 与 2021NO. 4)。

1 资料

1.1 数据来源

纳入 2020 年 10 月 23 日至 2023 年 9 月 26 日于中国中医科学院广安门医院南区、中日友好医院、北京中医药大学东直门医院、内蒙古自治区乌兰浩特市中西医结合医院、乌兰浩特市妇幼保健院、山东省德州联合医院就诊的冠心病患者共 472 例。所有患者在数据采集前均接受详细的知情同意讲解,严格遵循自愿参与原则,并签署知情同意书,确保研究符合医学伦理要求。

1.2 西医诊断标准

参考中华医学会心血管病分会《稳定性冠心病诊断与治疗指南》^[7]及中华人民共和国卫生行业标准《冠状动脉粥样硬化性心脏病诊断标准》^[8]制定冠心病诊断标准:1) 冠状动脉造影提示冠状动脉至少一支主要分支管腔直径狭窄在 50% 以上;2) 有明确的心肌梗死病史;3) 经皮冠状动脉介入治疗和/或冠状动脉旁路移植术后。具备以上任意一项即可诊断。

1.3 血瘀证辨证标准

参考《中药新药临床研究指导原则(试行)》^[9]对证候进行分类,并依据中华中医药学会心血管病分会制定的《冠心病心绞痛证候要素诊断标准》^[10]对冠心病患者血瘀证进行评分。冠心病血瘀证诊断标准:固定性胸痛 4 分、舌质紫暗或舌体有瘀点瘀斑 4 分、舌下静脉紫暗 3 分、面色紫暗 3 分、身体有瘀点或瘀斑 3 分、肢体麻木 2 分、口唇紫暗或暗红 2 分、脉涩 2 分,单一证候要素得分相加 ≥ 8 分即可诊断。

1.4 纳入标准

1) 符合上述冠心病诊断标准及血瘀证辨证标准;2) 年龄 18~85 岁;3) 具备问卷资料且脉诊、舌诊资料至少具备一项;4) 患者知情同意并签署知情同意书。

1.5 排除标准

1) 存在急性感染;2) 合并其他严重原发疾病,如肾、脑疾病和其他脏器损害;3) 神志不清、认知功能障碍或患有精神疾病,无法配合研究;4) 舌运动障碍、发音困难、反关脉、斜飞脉等原因导

致数据采集困难影响结果判断,以及所采集舌诊图片拍摄模糊或染苔;5) 无法按要求配合研究。

2 方法

2.1 客观化信息采集与分析

2.1.1 舌象信息 采集设备:使用本课题组自主研发的设备(型号 R120-75-18)。该设备是一台三面封闭,一面有人脸轮廓形罩口的遮光黑箱,罩口下方有可托起下颌的托盘,起标准定位作用。内置高分辨率摄像头及色标固定的标准光源 D50,可适用于各种采集场景。

采集方法:将舌面诊设备以 USB 口连接笔记本电脑,打开安装在电脑桌面上的舌面诊软件,建立受试者基本信息后即可新建测试。点击开始后,受试者在设备的提示音下配合拍摄,采集者观察电脑屏幕上出现的图像,对受试者头部摆放的位置、舌头伸出的程度做调整,并在调整好后点击电脑显示屏上的拍摄键,共采集受试者面、舌及舌下三个位置各 1 张图片,共 3 张图片。

舌象分析:图像先进行数据增强操作,如翻转、缩放、旋转等,然后使用迁移学习方法^[11],采用卷积神经网络^[12]进行特征提取并结合不同分辨率的信息将舌象进行多尺度融合^[13],经过交叉熵损失函数^[14],最后得出分类准确率。通过以下公式得出平均血管宽度和血管宽度变异度像素值。

平均血管宽度像素值计算公式如下:

$$\bar{W} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i$$

其中 N 为血管骨架像素点总数, W_i 为第 i 个骨架点的血管宽度, $\bar{W}$ 为平均血管宽度。

血管宽度变异度像素值计算公式如下:

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2}$$

其中 N 代表样本数, $\bar{W}$ 为平均血管宽度。

2.1.2 声诊信息 采集设备:采用本课题组前期研制的智能声诊系统,规范化录制患者在回答问题过程中的语音信息。

采集方法:嘱患者静坐,距离声诊系统麦克风 1.5 cm,连接话筒,填写基本信息后进入采集界面。采集内容包括 4 个常见问题的问答与 6 个拼音($\bar{a}$ 、 $\bar{o}$ 、 $\bar{e}$ 、 $\bar{i}$ 、 $\bar{u}$ 、 $\bar{ü}$),每条录音时间均为 5 s,嘱被检者按系统提示逐条发音完成录制。

声诊分析:将音频文件先进行高斯降噪后,进行分帧加窗、快速傅里叶变换、梅尔滤波器、对数

变换和余弦变换, 提取得到梅尔倒频谱系数, 再经过多层神经网络和交叉熵损失, 最终得出分类准确率。

2.1.3 脉象信息 采集设备: 本课题组前期研制的三探头中医脉诊仪(专利名称: 适用于中医脉搏检测的三探头机械装置, 专利号: ZL 2014 1 0069517. 6, 津械 20202200143, 型号: MS3-IV)能够模仿传统诊脉方法, 采集双手寸、关、尺三部脉诊。

采集方法: 受试者静坐 15 min, 调整呼吸后进行脉诊采集。采集者使用三个探头进行寸、关、尺定位, 调整探头压力以观察到最优波形。启动设备, 分别对两手脉诊信息按先左手后右手的顺序各采集 40 s。

脉象分析: 采用中国中医科学院医学实验中心开发的“脉诊数据库管理、建模与统计分析平台”进行数据处理。该平台使用 MATLAB 2018 开发的 GUI 程序进行脉象信息分析, 包括主成分分析(principal component analysis, PCA)、最小二乘回归(least squares, LS)与套索回归(lasso regression, Lasso)、*t* 检验、卡方检验等分析方法。数据预处理通过“中医脉诊信息数据库管理与分析系统”在 MATLAB 2018 平台完成, 采用离散余弦变换法滤波去噪并通过反变换还原数据, 有效减少环境干扰^[15]。随后依据脉诊信号强度、变化速度与加速度进行周期划分, 基于各周期长度构造三角函数, 并运用多周期最小二乘法建立 12 谐波模型^[15], 精确拟合样本中不同脉率的脉象信号, 从而实现脉象数据的标准化处理与分析。基于上述方法对双手寸、关、尺 6 个位置采集到的数据建模, 频域参数^[16]共有 24 个, 通过计算 12 个谐波的振幅和相位, 得到峰值 F1-F12 和初相角 C1-C12; 时域参数共 8 个, 分别为脉位、主波幅值 h1、急性射血期时值 t1、收缩期时值 t4、舒张期时值 t5、降中峡幅值/主波幅值 h4/h1、重搏波幅值/主波幅值 h5/h1、h1 上 1/3 的时值 w。6 个位置共用 1 个脉率参数, 即每位受试者的脉诊信息可以提取 193 个特征参数(32 个×6 个部位+1)。本研究相关的脉诊特征参数意义^[17]如下: 时域参数 h1 代表主波幅度, 与左心室射血功能及大动脉顺应性相关; t1 为主波峰时间, 对应左心室快速射血期; S1/S2 为急性射血期面积/舒张期面积, 主要反映主动脉顺应性和主动脉功能的情况; 频域参数代表产生差异的部位。

2.2 人工信息采集与分析

采集工具: 临床调查表(问卷星)。临床调查

表由本课题组设计, 调查内容包括: 受试者基本信息、身高、体重、现病史、既往史、舌象、脉象、中医症状及体征、冠状动脉造影结果、中医诊断、西医诊断及治疗用药情况等。

采集方法: 1) 要求受试者按照调查表上各条目的含义, 准确如实进行填写; 2) 在自然光照下, 由采集者观察受试者舌象, 并如实勾选相应选项; 3) 在受试者静息平复状态下, 采集者以举按循切脉, 切脉时间按照“五十动”原则候脉时间左右手各 1 min, 判断并记录受试者的脉位、频数、大小、宽度、力度等基础脉象及滑涩弦紧等脉形。本研究采集者资质为具有执业中医医师证书的专业医生根据量表的结果, 由两位医务人员对所有患者的证型进行确定, 出现不一致时由高级职称专家再进行判断。

数据分析: 对临床调查表收集的患者性别、年龄、舌象、脉象及中医症状、体征等情况进行统计, 按照证候量化诊断标准对主观舌象、脉象、临床症状及体征进行赋值并依据证候诊断阈值对冠心病患者的所属证候类型进行判断。最后使用机器学习随机森林方法来进行二分类。

2.3 数据管理与质量控制

对数据采集人员进行统一培训, 使其能够熟练、准确地采集, 以确保临床数据的真实性和可靠性。应用规范化采集设备, 数据实时传输, 及时分类保存, 由专人统一管理, 并指派监察人员定期对数据进行核查。

2.4 数据处理与分析

本研究开发了一种基于多模态数据融合的中医血瘀证智能诊断系统。该系统采用深度学习技术, 使用卷积神经网络提取深层视觉特征并通过改进的注意力机制提取舌下络脉特征, 结合特征重要性使用机器学习随机森林方法评估筛选问诊指标, 并利用时域分析和梅尔频谱技术分别处理脉象和声诊数据。基于多模态融合策略, 系统整合舌象、脉象、声诊信息和问卷星信息, 构建端到端的深度分类神经网络模型, 该模型能够自动学习不同模态间的非线性关系, 实现特征的有效融合与信息互补, 最终实现血瘀证的精准辨识。该方法为提升诊断准确性提供了新的思路, 有望为中医证候的客观化研究提供技术支持。

2.5 模型评价

本研究采用多维度评估体系对血瘀证诊断模型进行性能验证。基于混淆矩阵构建评价指标, 包括真阳性(TP)、假阳性(FP)、真阴性(TN)、假阴

性 (FN) 四个基本参数。测试集共 36 例, 其中单模态最优舌诊模型预测正确为 30 例, 最优模态组合预测正确为 31 例。数据集按训练集: 验证集: 测试集=9: 1: 1 进行随机切分, 总例数为 426。通过准确率评估模型的整体诊断效能, 确保系统的基础判别能力; 利用召回率衡量对血瘀证患者的识别完整性, 降低临床漏诊风险; 结合精确率评估诊断的准确性, 避免过度医疗干预; 同时引入 F1 值作为综合指标, 在漏诊控制和误诊防范间实现最优平衡。这套多维评价体系为模型在临床实践中的可靠性和应用价值提供了科学依据^[18]。

$$\text{准确率 (Accuracy)} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\%$$

准确率: 反映模型整体诊断效能的指标, 表示所有预测中正确预测的比例。

$$\text{召回率 (Recall)} = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\%$$

召回率: 衡量模型对血瘀证患者识别完整性的指标, 表示实际血瘀证患者中被正确识别的比例。

$$\text{精确率 (Precision)} = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\%$$

精确率: 评估诊断准确性的指标, 表示预测为血瘀证的患者中真正患有血瘀证的比例。

$$\text{F1 值 (F1-Score)} = \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \times 100\%$$

F1 值: 精确率和召回率的调和平均数, 综合评估模型在漏诊控制和误诊防范间的平衡能力。

2.6 统计学方法

使用 SPSS 26.0 软件进行数据统计。符合正态分布的计量资料用均数±标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 采用 t 检验进行组间比较; 不符合正态分布的计量资料用 $M (P_{25}, P_{75})$ 表示, 采用 Mann-Whitney U 检验

进行组间比较; 计数资料以频数或百分比 (%) 表示, 采用卡方检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

3 结果

3.1 一般数据情况

本研究共采集 472 例冠心病患者客观化四诊数据, 排除舌诊图片模糊的样本 46 例, 最终纳入 426 例进行分析, 其中冠心病血瘀证组 221 例, 非血瘀证组 205 例。两组冠心病患者一般资料比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 具有可比性。详见表 1。

表 1 两组冠心病患者一般资料比较

Table 1 Comparison of baseline characteristics between two groups of patients with coronary heart disease

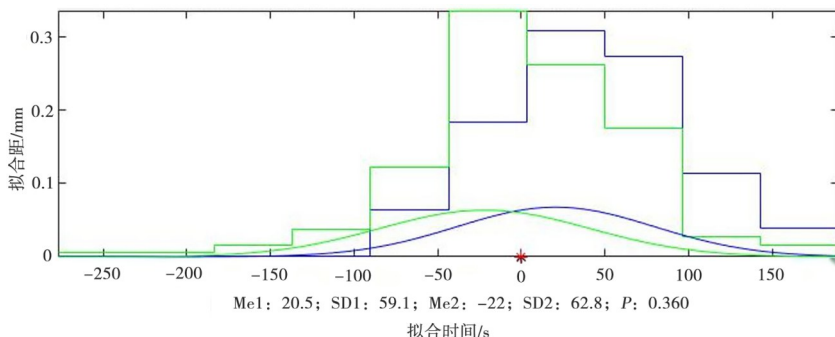
组别	例数	女性/例 (%)	年龄/岁, $\bar{x} \pm s$	BMI/kg·m ⁻² , $\bar{x} \pm s$
血瘀证组	221	167 (75.6%)	64.58±10.75	25.20±3.28
非血瘀证组	205	143 (69.8%)	61.44±10.72	25.86±4.85
χ^2/t 值		1.32	1.11	1.75
P 值		0.250	0.270	0.080

注: BMI, 身体质量指数。

3.2 脉诊客观化分析结果

3.2.1 主成分分析 通过无监督学习, 两组数据的脉诊信息存在显著差异, 区别两组数据最显著的主成分主要体现在第一主成分上, 其 $P=0.010$, 表明二者不能准确分类的概率为 1%, 即分类准确率为 99%。当 $t < 0.05$ 且 $F > 0.05$ 时, 代表该主成分为区别两组数据最显著的主成分 (即第一主成分)。详见附图 1 (请扫描本文二维码获取)。

3.2.2 LS 识别 由图 1 可知, 冠心病血瘀证组与非血瘀证组在脉诊参数上存在显著差异 ($P=0.360$), 则说明 LS 不能判决准确率为 36%, 而判决准确率达到了 64%。



注: 红色*代表判决点; Me代表均值, SD代表标准差, P 值代表不能准确分类的概率; 蓝色代表冠心病血瘀证组, 绿色代表冠心病非血瘀证组。

图 1 冠心病血瘀证组与非血瘀证组患者脉诊信息最小二乘回归 (LS) 识别分析图

Figure 1 Least squares regression identification and analysis diagram of pulse diagnosis information in coronary heart disease patients with blood stasis syndrome and non-blood stasis syndrome

3.2.3 Lasso 识别 血瘀证与非血瘀证患者脉诊信息 Lasso 分析显示 $P=0.400$ ，表明该方法对两组数据不能判别准确率 40%，判别准确率为 60%。详见附图 2（请扫描本文二维码获取）。

3.2.4 特征参数分析 表 2 示，脉诊信息特征参数，在时域参数上其差异比较明显的为血瘀证组左手寸脉力 h1 低于非血瘀证组，左手关 S1/S2 和右手尺 t1 均高于非血瘀证组。表 3 示，频域参数在左右手寸关尺均产生差异，以左手尺和右手关脉最显著。

表 2 冠心病血瘀证组与非血瘀证组患者脉诊信息
时域参数比较

Table 2 Comparison of frequency domain parameters of pulse diagnosis information between coronary heart disease patients with blood stasis syndrome and non-blood stasis syndrome ($\bar{x}\pm s$)

时域参数	血瘀证组 (202 例)	非血瘀证组 (188 例)	P 值
左寸脉力 h1	2.33±1.27	2.59±1.21	0.018
左关 S1/S2	0.30±0.12	0.27±0.11	0.008
右尺 t1	0.17±0.05	0.16±0.05	0.019

注：h1 代表主波幅度，与左心室射血功能及大动脉顺应性相关；t1 为主波峰时间，对应左心室快速射血期；S1/S2 为急性射血期面积/舒张期面积，主要反映主动脉顺应性和主动脉功能的情况。

3.3 舌诊客观化分析结果

将血瘀证组与非血瘀证组的舌下络脉图像进行分

割处理，并对其形态学特征进行定量分析，首先使用自适应阈值分割提取血管二值图像，然后进行骨架化算法计算形态学特征（平均血管宽度和血管宽度变异度）。表 4 示，与非血瘀证组比较，血瘀证组的平均血管宽度和血管宽度变异度均显著升高 ($P<0.05$)。

表 4 冠心病血瘀证组与非血瘀证组患者舌下络脉血管宽度
像素值比较

Table 4 Comparison of pixel values of sublingual collateral vessel width between coronary heart disease patients with blood stasis syndrome and non-blood stasis syndrome

[$M(P_{25}, P_{75})$]			
组别	例数	平均血管宽度	血管宽度变异度
血瘀证组	221	11.15(10.45, 11.98)	3.98(3.37, 4.75)
非血瘀证组	205	4.13(3.85, 4.35)	1.38(1.18, 1.56)
U 值		22 707	22 704
P 值		<0.001	<0.001

散点图（图 2）结果显示，血瘀证组（红色点）的分布主要集中在较高的血管宽度区域，而非血瘀证组（蓝色点）则主要分布在较低的宽度区域。两组数据呈现出明显的分离趋势。

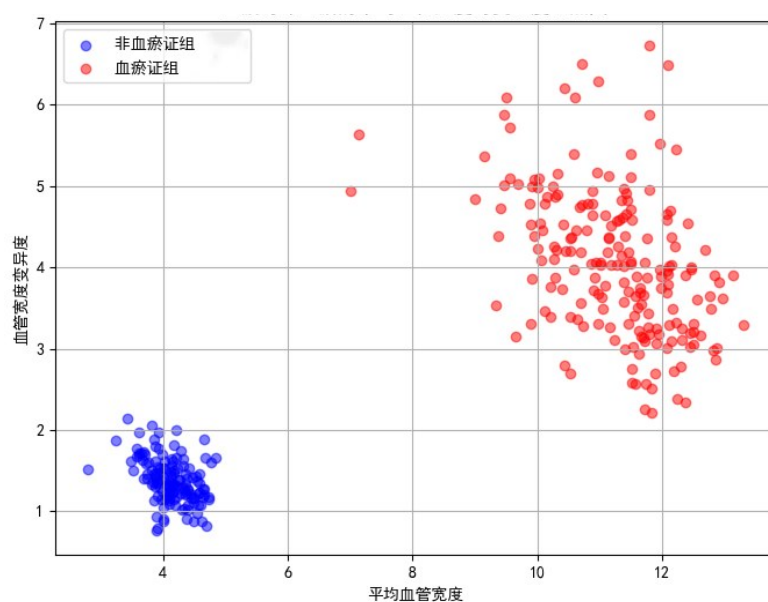
箱线图（图 3）结果显示，两组在平均血管宽度和宽度变异度的统计分布上存在显著差异，血瘀证组高于非血瘀证组。

表 3 冠心病血瘀证组与非血瘀证组患者脉诊信息频域参数比较

Table 3 Comparison of frequency domain parameters of pulse diagnosis information between coronary heart disease patients with blood stasis syndrome and non-blood stasis syndrome ($\bar{x}\pm s$)

频域参数	血瘀证组(202 例)	非血瘀证组(188 例)	P 值	频域参数	血瘀证组(202 例)	非血瘀证组(188 例)	P 值
左寸能量 6	0.52±0.34	0.59±0.43	0.028	右寸能量 6	0.55±0.38	0.65±0.48	0.016
左寸能量 7	0.24±0.18	0.29±0.25	0.011	右寸能量 7	0.24±0.18	0.30±0.33	0.017
左寸能量 8	0.15±0.11	0.18±0.16	0.007	右寸能量 8	0.15±0.14	0.18±0.18	0.029
左寸能量 11	0.03±0.04	0.04±0.06	0.028	右寸能量 9	0.09±0.11	0.11±0.13	0.036
左关能量 7	0.26±0.15	0.29±0.20	0.040	右关能量 1	76.61±5.42	75.68±5.23	0.044
左关能量 9	0.10±0.08	0.11±0.09	0.047	右关能量 3	4.64±2.17	5.11±2.71	0.031
左关相位 9	0.08±0.01	0.07±0.02	0.022	右关能量 4	1.59±0.66	1.72±0.81	0.042
左尺能量 1	78.11±5.61	76.07±9.29	0.005	右关相位 5	0.11±0.02	0.10±0.02	0.025
左尺能量 3	3.99±1.74	4.68±3.09	0.004	右关能量 6	0.62±0.38	0.70±0.40	0.031
左尺能量 5	1.26±0.51	1.49±1.79	0.045	右关能量 7	0.25±0.15	0.30±0.21	0.009
左尺能量 6	0.50±0.30	0.65±0.85	0.013	右关能量 10	0.06±0.05	0.07±0.07	0.029
左尺能量 7	0.26±0.15	0.35±0.64	0.027	右关能量 11	0.03±0.03	0.04±0.05	0.022
左尺能量 8	0.16±0.11	0.22±0.36	0.011	右关能量 12	0.02±0.03	0.03±0.03	0.029
左尺相位 8	0.09±0.01	0.08±0.02	0.048	右尺能量 1	76.78±5.24	75.26±7.96	0.014
右寸能量 9	0.09±0.11	0.11±0.13	0.036	右尺能量 3	4.65±2.03	5.33±3.50	0.011
左尺能量 10	0.05±0.05	0.09±0.28	0.038	右尺能量 6	0.59±0.39	0.71±0.71	0.015
左尺能量 11	0.03±0.03	0.04±0.06	0.024	右尺相位 12	0.05±0.03	0.06±0.02	0.005
右寸相位 3	0.20±0.02	0.19±0.02	0.031				

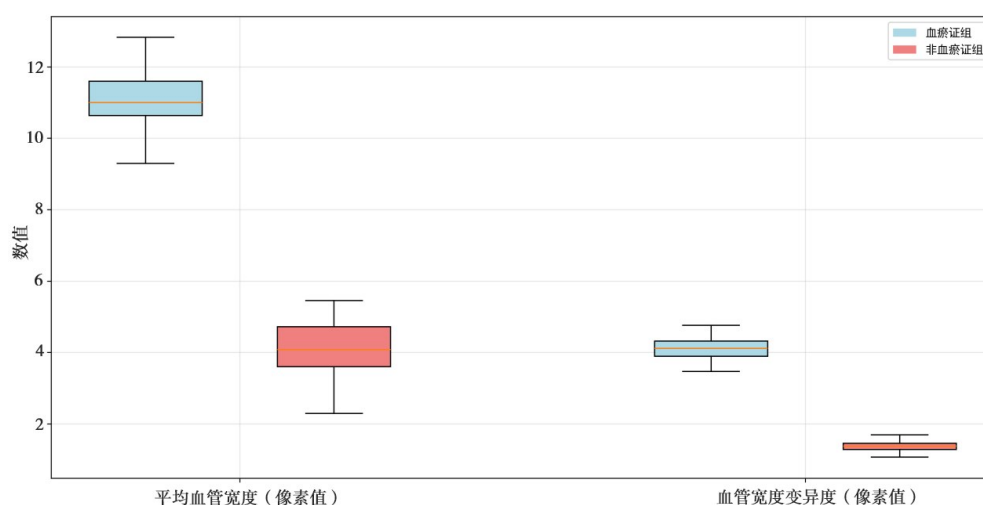
注：频域参数代表产生差异的部位，频域参数均经过 Bonferroni 校正且进行了 10 次检验，最终得到显著性水平 $P=0.005$ 。



注：纵、横坐标轴单位名称均为像素值。

图2 冠心病血瘀证组与非血瘀证组患者舌下络脉血管宽度特征散点图

Figure 2 Scatter plot of sublingual collateral vessel width characteristics of coronary heart disease patients between blood stasis syndrome and non-blood stasis syndrome groups



注：横坐标为分类标签，纵坐标为像素值。

图3 冠心病血瘀证组与非血瘀证组患者舌下络脉血管宽度特征箱线图

Figure 3 Box plot of sublingual collateral vessel width characteristics between blood stasis syndrome and non-blood stasis syndrome groups

3.4 问诊可解释性分析

采用机器学习算法，对冠心病血瘀证组与非血瘀证组的临床问诊数据进行特征重要性分析，最具鉴别价值的7个临床症状特征（特征重要性）依次为舌下络脉粗张(4.3534)、舌下络脉迂曲(3.2865)、胸痛(3.1583)、胸闷(2.1044)、脉涩(2.0792)、心悸(1.5351)以及气短(1.0232)。

3.5 多模态融合诊断模型评估结果

通过多模态融合方法对冠心病血瘀证组的四诊

信息进行建模分析。结果显示，单模态诊断准确率55.88%~83.33%，详见表5，数据可视化内容见附图3（请扫描本文二维码获取）。通过模态组合优化，最优双模态（舌诊+问诊）准确率提升至80.56%，最优三模态（舌诊+脉诊+问诊）进一步提升至83.33%，四模态组合（舌诊+声诊+脉诊+问诊）准确率达到86.11%，表明其为冠心病血瘀证诊断的最优模态组合。

表5 冠心病血瘀证组多模态诊断模型结果
Table 5 Results of multi-modal diagnostic model for coronary heart disease patients in blood stasis syndrome group (%)

模态	准确率	精确率	召回率	F1 值
脉诊	55.88	52.22	51.79	50.72
声诊	71.88	72.30	71.88	72.02
舌诊	83.33	82.97	83.81	83.12
问诊	80.56	80.12	80.90	80.56
最优双模态(舌诊+问诊)	80.56	80.69	81.94	80.56
最优三模态(舌诊+脉诊+问诊)	83.33	83.44	84.06	83.33
多模态融合(舌诊+脉诊+声诊+问诊)	86.11	86.17	86.35	86.11

4 讨论

4.1 脉象信息客观化分析

本研究通过对冠心病脉诊信息分析发现，血瘀证组与非血瘀证组存在显著差异。采用的PCA、LS、Lasso分析三种分类方法均显示出良好的判别效能，其中PCA显示在第一主成分上具有显著区分度（99%）。LS和Lasso方法也分别达到64%和60%的判决准确率，进一步验证了冠心病血瘀证组和非血瘀证组脉象特征的差异性。

国医大师李士懋认为可用脉搏的振幅来判断涩脉^[19]。通过分析冠心病血瘀证组与非血瘀证组的脉象时域参数发现，血瘀证组左手寸脉力h1偏低，h1代表脉搏波主波的幅度，说明血瘀证患者脉象偏涩，符合冠心病中医证候诊断标准中对血瘀证脉象的描述^[20]。左寸候心，《素问·五脏生成篇》曰“心主血脉”，并提到“诸血者，皆属于心”。故冠心病血瘀证患者脉象在左寸位置更明显，也符合胸痹病位在心的特点。

S1代表心脏急性射血期脉搏波面积，代表心脏的射血功能和心脏排出血液的量，S2代表心脏舒张期脉搏波面积，S1/S2代表主动脉的顺应性，当S1/S2值变大时，通常提示收缩期压力相对增高或舒张期压力相对降低，主动脉顺应性降低，反映了血管弹性减弱、血流受阻，可见于冠心病患者伴动脉粥样硬化。血瘀证是血液运行不畅、脉络瘀阻的表现，与主动脉顺应性降低的病理机制高度相关。故冠心病血瘀证组左手关S1/S2值升高，可以说明该组患者血液黏度增高，血管壁变硬，血流缓慢，符合血瘀证的特点。《素问·痹论篇》云：“痹在于脉则血凝而不流。”《灵枢·经脉》记载：“手少阴气绝则脉不通，脉不通则血不流。”血瘀证“血凝而不流”“脉不通”等特点与现代医学中血液黏稠度增高、血管内皮功能障碍、主动脉顺应性降

低的病理机制高度相关^[21]，进一步揭示了血瘀证的形成机制。故冠心病血瘀证组左手关S1/S2值升高，可以考虑脉涩或者脉弦。

t1升高（即脉搏波从起始点到达收缩期峰值的时间延长）反映了血流动力学的异常，通常提示血管弹性降低、血流速度减慢或心脏射血功能减弱。血瘀证的核心是血行不畅、脉络瘀阻，两者病理机制高度吻合。同时t1升高，射血时间延长，可以考虑血瘀证组脉迟。频域参数在左右手寸关尺均有差异，以左手尺和右手关脉最显著，根据中医脉学中左寸候心、左关候肝、左尺候肾、右寸候肺、右关候脾、右尺候肾，以及《中医内科学》中胸痹的病位主要在心、与肺和脾关系密切、同时涉及肝和肾^[22]的观点，考虑冠心病血瘀证虽然病位主要在心，但也与脾肾关系比较密切。脾为气血生化之源，脾虚则气血不足，痰湿内生，进一步阻滞心脉；肾为先天之本，主藏精，肾阴不足则心阴亏虚，均可导致胸痹的发生或加重。综上所述，这些脉诊客观化指标为冠心病血瘀证的辨识提供了客观化依据，亦为脉诊在证候辨识中的应用价值提供了有力支撑。

4.2 舌象信息客观化分析

舌诊在中医临床中的应用历史悠久。《黄帝内经》中即提到与舌诊相关的内容，如《素问·金匱真言论篇》“心开窍于舌”，《灵枢·经脉》“心者脉之合也，脉不通则血不流”。由此可知，舌诊能反映血脉运行情况，故冠心病血瘀证患者舌质紫暗或有瘀斑、瘀点，舌下络脉粗张，符合冠心病中医证候诊断标准中对血瘀证脉象的描述。中医学认为，舌体为心所主，脉络通达，内连脏腑，外候气血。舌象的细微变化能够反映脏腑阴阳盛衰、气血运行、津液代谢以及邪正消长的动态变化，对辨证论治具有重要的指导意义。

在血瘀证的辨识中，舌诊发挥着不可替代的作用。其中，舌下络脉粗张因其直观性和易辨识性，成为血瘀证辨识的重要依据。故本研究通过对冠心病血瘀证组与非血瘀证组舌下络脉特征的比较，两组血管宽度特征的差异显著。血瘀证组患者的舌下络脉平均血管宽度和宽度变异度均高于非血瘀证组，表明血瘀证患者的舌下络脉普遍较粗，且宽度变化更大。这一结果与中医理论中“舌下络脉粗张”的描述高度吻合。舌下络脉粗张是血瘀证的重要舌象特征，其形态学特征的定量分析为中医血瘀证的辨识提供了科学依据。

4.3 多模态数据融合的诊断模型结果分析

四诊合参作为中医传统诊断的重要方法,在现代人工智能技术的推动下,正逐步实现客观化与智能化。近年来,深度学习技术在中医诊断领域的应用取得了显著进展,研究者通过构建端到端的中医证候分类模型,实现了从症状输入到证候输出的精准预测^[23]。本研究基于深度学习技术,整合冠心病血瘀证与非血瘀证患者的脉象、舌象、声诊及人工信息采集等多模态客观化数据,构建了多模态融合的冠心病血瘀证诊断模型,并系统评估了不同模态组合对冠心病血瘀证辨识的影响。结果显示,血瘀证组在单模态中,舌诊辨别准确率最高达到准确率 83.33%,而脉诊、声诊及问诊均低于多模态组合;在多模态中,最优模态组合(舌诊+脉诊+问诊+声诊)达到最高准确率为 86.11%。这一结果验证了舌诊作为冠心病血瘀证辨识的重要依据,以及多模态信息融合在提升中医证候辨识准确性方面的优势,与传统四诊合参理论相契合,为中医诊断客观化研究提供了新的技术路径。

多模态融合策略能够全面反映血瘀证的主要临床特征,帮助临床医生更精准地把握证候特点,提高诊断效率。这种将传统中医诊断方法与现代人工智能技术相结合的研究思路,不仅推动了中医诊断的标准化与规范化,也为中医药现代化发展提供了新的范式。

4.4 与同类研究工作比较分析

以往针对冠心病血瘀证的研究主要集中在文献分析和动物实验等方面,近年来,随着智能化采集设备的快速发展,四诊客观化研究在冠心病证候辨识领域也取得了一些成果。例如,买莹莹等^[24]发现冠心病患者在不同证候下舌色和苔色参数存在显著差异;Chen 等^[4]通过提取声音信号特征参数,并将其输入支持向量机分类机,发现气虚与阴虚、实证与虚证的辨识准确率较高;王忆勤等^[25]在构建冠心病证候诊断模型时,以脉象信号的幅度变化率征参数替代时域特征参数,可显著提升模型的平均识别准确率;此外,Ren 等^[26]利用智能诊断设备采集冠心病患者的舌象和面色信息,并基于 logistic 回归建立了冠心病痰瘀互结证的定量辨证模型。以上对冠心病证候诊断模型相关的研究,多为单模态(如单一舌诊、脉诊、声诊),缺乏客观化四诊信息融合的多模态数据研究,与上述研究相比,本研究首次提出了基于四诊客观化多模态数据融合,实现了冠心病血瘀证诊断模型的构建,显著提升了模型

性能。

4.5 创新性与临床价值

本研究一方面为客观化舌诊信息作为识别冠心病血瘀证的关键指标提供了客观化依据,同时也提出了基于四诊客观化的多模态数据融合进行冠心病血瘀证诊断模型构建,为冠心病血瘀证诊断模型构建提供了全新的科学范式,从而为临床其他疾病的证候诊断提供了方法学支撑。另一方面将有助于提升临床医生对冠心病血瘀证诊断的科学化与规范化,更加便捷地辅助临床医生进行更精准和客观地诊断,为个性化治疗提供客观化依据,显著提高诊疗效率,尤其是在基层医疗和远程医疗场景中发挥重要作用,从而推动中医药现代化与数字化进程,助力中医药事业的传承与创新发展,具有重要的临床价值。

4.6 局限性与展望

本研究存在一些局限性:1) 研究样本量相对有限,尽管采用了 7:2:1 的训练-验证-测试划分比例及 5 折交叉验证策略,但样本基数较小仍可能影响模型的泛化能力。2) 临床数据采集过程中存在挑战,尤其是脉诊和声诊数据受到多种外部因素干扰,包括当地采集环境差异、患者情绪状态等,这些因素可能导致信号产生变异。虽然我们采用了信号漂移校正和降噪等预处理技术,但这些外部干扰因素仍可能影响模型性能。3) 本研究使用的早期融合方法虽在计算效率上具有优势,但可能未能充分捕捉不同模态间的复杂交互关系。

未来改进方向包括:1) 扩大样本规模,增强模型的泛化能力;2) 改进采集仪器设计,提高其抗干扰能力和信号稳定性;3) 制定更严格的数据采集标准,控制环境因素对测量结果的影响;4) 探索更有效的信号处理算法,进一步降低外部因素对脉象特征提取的干扰。通过这些改进,期望提升模型在多样化临床环境中的适用性和准确性。

综上所述,本研究通过四诊客观化的多模态数据融合显著提升了冠心病血瘀证诊断的准确性,为中医冠心病血瘀证辨识的客观化提供了科学依据,具有重要的临床应用价值和研究意义。

参考文献

- [1] 刘明波,何新叶,杨晓红,等.《中国心血管健康与疾病报告 2023》要点解读[J]. 中国全科医学, 2025, 28(1): 20-38.
- [2] 黄湘龙,李霄,杨丰文,等. 1970-2021 年冠心病中医证

- 候特征演变规律文献研究[J]. 中医杂志, 2023, 64(10): 1058-1063.
- [3]王永霞,郑佳,李巧稚,等. 2021-2023 年中医药防治常见心血管疾病研究述评[J]. 中医杂志, 2024, 65(11): 1189-1195.
- [4]CHEN CF, WANG YQ, YAN JJ, et al. Application of voice signal collection and analysis in traditional Chinese medicine syndrome differentiation of deficiency and excess [J]. J Integr Med, 2010, 8(10): 944-948.
- [5]许文杰,刘攀,燕海霞,等. 528 例冠心病患者中医脉象非线性动力学特征在证候诊断模型中的应用[J]. 中华中医药杂志, 2014, 29(5): 1661-1665.
- [6]莫国风,王烨,常娜娜,等. 基于深度学习 ConvNeXt 模型的冠心病痰湿证舌诊信息分类辨识[J]. 中国医药导报, 2024, 21(16): 21-23,45.
- [7]中华医学会心血管病学分会介入心脏病学组,中华医学会心血管病学分会动脉粥样硬化与冠心病学组,中国医师协会心血管内科医师分会血栓防治专业委员会,等. 稳定性冠心病诊断与治疗指南[J]. 中华心血管病杂志, 2018, 46(9): 680-694.
- [8]卫生部医疗服务标准专业委员会. 冠状动脉粥样硬化性心脏病诊断标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- [9]郑筱萸. 中药新药临床研究指导原则(试行)[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2002: 383.
- [10]中华中医药学会心血管病分会. 冠心病心绞痛证候要素诊断标准[J]. 中医杂志, 2018, 59(6): 539-540.
- [11]PAN SJ, YANG Q. A survey on transfer learning [J]. IEEE Trans Knowle Data Engin, 2010, 22(10): 1345-1359.
- [12]LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proce IEEE, 1998, 86(11): 2278-2324.
- [13]LIN TY, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection [C]// Institute of Electrical and Electronics Engineers. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017: 2117-2125.
- [14]SHANNON CE. A mathematical theory of communication [J]. Bell Syst Tech J, 1948, 27(3): 379-423.
- [15]汪南玥,吴文湘,刘佳,等. 孕早期脉诊信息特征分析[J]. 中华中医药杂志, 2020, 35(11): 5525-5528.
- [16]宋诗博,安二匣,樊西倩,等. 阴虚体质人群脉诊信息特征研究[J]. 中国中医基础医学杂志, 2022, 28(3): 387-390.
- [17]丁艳,李阳,王烨,等. 基于客观化多模态数据融合的亚健康肝郁脾虚证诊断模型构建[J]. 中华中医药杂志, 2025, 40(1): 71-76.
- [18]SOKOLOVA M, LAPALME G. A systematic analysis of performance measures for classification tasks [J]. Inform Proc Manage, 2009, 45(4): 427-437.
- [19]张佳琪,刘佳,周灵运,等. 涩脉形态特点剖析[J]. 中华中医药杂志, 2017, 32(6): 2394-2396.
- [20]宋诗博. 冠心病气虚血瘀证中医舌、脉信息客观化研究[D]. 北京:中国中医科学院, 2022.
- [21]冼绍祥,黄鹍,刘小虹,等. 冠心病心血瘀阻证研究进展[J]. 新中医, 2001, 33(7): 72-74.
- [22]吴勉华,石岩. 中医内科学[M]. 北京:中国中医药出版社, 2021: 111.
- [23]CHEN Z, ZHANG D, LIU C, et al. Traditional Chinese medicine diagnostic prediction model for holistic syndrome differentiation based on deep learning [J]. Integr Med Res, 2024, 13(1): 101019.
- [24]买莹莹,董梦青,李福凤. 冠心病不同证候舌诊信息特征研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2020, 22(5): 1567-1572.
- [25]郭睿,王忆勤,颜建军,等. 基于递归定量分析的冠心病中医脉象特征提取与分析[J]. 中西医结合学报, 2011, 9(11): 1226-1233.
- [26]REN Q, ZHOU XW, HE MY, et al. A quantitative diagnostic method for phlegmand blood stasis syndrome in coronary heart disease using tongue, face, and pulse indexes: an exploratory pilot study [J]. J Altern Complement Med, 2020, 26(8): 729-737.

Construction of a Diagnostic Model for Coronary Heart Disease with Blood Stasis Syndrome Based on Objective Multi-Modal Data Fusion

DING Yan¹, WANG Ye², LIU Jia^{1,2}, WANG Nanyue^{1,2}

1. Experimental Research Center, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing, 100700; 2. Beijing Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Basic Research on Prevention and Treatment of Major Diseases

ABSTRACT Objective To construct a diagnostic model for coronary heart disease (CHD) with blood stasis syndrome by integrating objective multi-modal data from the four examinations of traditional Chinese medicine (TCM), thereby enhancing the accuracy and objectivity of TCM syndrome differentiation. **Methods** A total of 426 patients

with CHD were enrolled and divided into blood stasis syndrome group (221 cases) and non-blood stasis syndrome group (205 cases). Different devices were used to collect tongue image, pulse manifestation, and auscultation information of CHD patients, so as to establish an objective TCM four-diagnostic database for CHD. Meanwhile, clinical questionnaires were used for manual information collection. In single-modal analysis, pulse diagnosis data were discriminated using principal component analysis (PCA), least squares regression (LS), and Lasso regression; tongue diagnosis data were classified using a convolutional neural network; manually collected information data were classified using a random forest. For multi-modal modeling, deep learning was used to splice multi-source information, such as pulse manifestations and tongue images, with inquiry data from CHD patients with blood stasis syndrome through a fully connected layer, thereby constructing the diagnostic model for CHD with blood stasis syndrome.

Results The single-modal objective analysis showed that in the pulse analysis, there were significant differences in pulse diagnosis information between the blood stasis syndrome group and the non-blood stasis syndrome group. The PCA difference was mainly in the first principal component, with a discrimination accuracy of 99% ($P=0.010$); the classification accuracy of LS and Lasso was 64% ($P=0.360$) and 67% ($P=0.400$), respectively. Compared with the non-blood stasis syndrome group, the time-domain parameter differences in the blood stasis syndrome group were mainly manifested as a decrease in the left-hand *Cun* pulse force $h1$ ($P=0.018$), and increases in the left-hand *Guan* pulse $S1/S2$ ($P=0.008$) and right-hand *Chi* pulse $t1$ ($P=0.002$); the frequency-domain parameter differences were particularly significant in the left-hand *Chi* pulse and right-hand *Guan* pulse. In the tongue analysis, the average vascular width and variability of sublingual collaterals in the blood stasis syndrome group were significantly higher than those in the non-blood stasis syndrome group. In the analysis of manually collected information, the clinical features with the highest discriminative value for blood stasis syndrome included distended and tortuous sublingual collaterals, chest pain, chest tightness, rough pulse, palpitations, and shortness of breath. In addition, among the single-modal analysis in the blood stasis syndrome group, the tongue diagnosis achieved the highest discrimination accuracy of 83.33% (30/36), while the accuracy of pulse, auscultation, and inquiry diagnosis was lower than that of tongue diagnosis. The optimal modal combination (tongue diagnosis + pulse diagnosis + inquiry + auscultation) achieved the highest accuracy of 86.11% (31/36), which was superior to the single-modal model.

Conclusion The diagnostic model based on multi-modal data fusion can effectively achieve objective differentiation of coronary heart disease with blood stasis syndrome, validating the advantage of multi-modal information fusion in improving TCM syndrome differentiation accuracy, and providing scientific evidence for objective research of TCM syndrome diagnosis.

Keywords coronary heart disease; blood stasis syndrome; four-diagnostic objectification; multi-modal data fusion; diagnostic model

(收稿日期: 2025-03-20; 修回日期: 2025-08-16)

[编辑: 焦 爽]