

# 心磁图探索主动脉瓣狭窄与冠心病心肌电磁特征的差异：一项前瞻性队列研究

刘靓靓<sup>1,2,3</sup>, 张颖倩<sup>2,3</sup>, 王晶<sup>3</sup>, 单冬凯<sup>2,3</sup>, 蒋博<sup>2,3</sup>, 田峰<sup>2,3</sup>, 陈韵岱<sup>2,3</sup>, 刘长福<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>解放军医学院, 北京 100853; <sup>2</sup>解放军总医院第一医学中心心血管内科, 北京 100853; <sup>3</sup>解放军总医院第六医学中心心血管病医学部, 北京 100048

[临床试验注册号] ChiCTR2300074399

[中图分类号] R542.5

[文献标志码] A

[DOI] 10.11855/j.issn.0577-7402.0258.2026.0615

[声明] 本文所有作者声明无利益冲突

[引用本文] 刘靓靓, 张颖倩, 王晶等. 心磁图探索主动脉瓣狭窄与冠心病心肌电磁特征的差异: 一项前瞻性队列研究[J]. 解放军医学杂志, DOI:10.11855/j.issn.0577-7402.0258.2026.0615.

[收稿日期] 2026-02-02

[录用日期] 2026-06-08

[上线日期] 2026-06-15

**[摘要]** **目的** 探讨心磁图在区分主动脉瓣狭窄(AS)与冠心病(CHD)引起的心肌缺血所呈现的不同电磁特征中的价值。**方法** 本研究为单中心、前瞻性队列研究。纳入2023年10月—2025年12月在解放军总医院第一医学中心就诊的556例可疑心肌缺血的患者, 根据超声心动图和冠状动脉造影结果进行分组, 其中AS患者30例, CHD患者111例。比较两组间的基线特征差异, 随后提取心磁图(MCG)参数; 采用加权LASSO回归结合Bootstrap验证筛选特征参数, 二元logistic回归构建鉴别模型, 并通过受试者操作特征(ROC)曲线下面积(AUC)、5折交叉验证、校准曲线及Hosmer-Lemeshow检验评估模型的性能。**结果** AS组与CHD组在年龄及N末端B型利钠肽前体(NT-proBNP)、左室射血分数(LVEF)等心功能指标方面存在显著差异( $P<0.05$ )。通过纳入MCG参数中的RS段负磁极离心率平均值、R波峰磁极离散度、QR段偶极子中心轨迹距离、TT段偶极矩平均值和T波峰磁场角度构建模型。ROC曲线分析显示, 模型在完整数据集上区分AS与CHD的AUC为0.881(95%CI 0.817~0.946), 敏感性84.68%, 特异性80.00%。5折交叉验证的AUC为0.836。Hosmer-Lemeshow检验结果显示无显著校准偏差( $P=0.228$ )。**结论** 基于特定MCG参数构建的模型能初步区分AS与CHD, 量化了两者不同的电生理模式, 为鉴别心绞痛病因提供了新线索。

**[关键词]** 主动脉瓣狭窄; 冠心病; 心磁图; 心肌缺血

## Magnetocardiography reveals distinct electromagnetic features in aortic stenosis and coronary heart disease: a prospective study

Liu Liang-Liang<sup>1,2,3</sup>, Zhang Ying-Qian<sup>2,3</sup>, Wang Jing<sup>3</sup>, Shan Dong-Kai<sup>2,3</sup>, Jiang Bo<sup>2,3</sup>, Tian Feng<sup>2,3</sup>, Chen Yun-Dai<sup>2,3</sup>, Liu Chang-Fu<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Chinese PLA Medical School, Beijing, 100853, China

<sup>2</sup>Department of Cardiology, First Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

<sup>3</sup>Department of Cardiovascular Medicine, the Sixth Medical Center of the Chinese People's Liberation Army General Hospital, Beijing, 100048, China

This work was supported by the Research on the Prevention and Treatment of Cancer, Cardiovascular and Cerebrovascular, Respiratory and Metabolic Diseases

**[Abstract]** **Objective** To evaluate magnetocardiography (MCG) in differentiating the electromagnetic features of myocardial ischemia caused by aortic stenosis (AS) versus coronary heart disease (CHD). **Methods** In this prospective single-center cohort study, 556 patients with suspected myocardial ischemia were enrolled. After grouping based on echocardiography and

[基金项目] 国家科技重大专项(2024ZD0527100)

[作者简介] 刘靓靓, 硕士研究生, 主要从事结构性心脏病的影像学方面的研究

[通信作者] 刘长福, E-mail: liucf301@126.com

coronary angiography findings, 30 patients with AS and 111 patients with CHD were identified. Baseline characteristics were first compared between the two groups. Subsequently, magnetocardiography (MCG) parameters were extracted, the weighted LASSO regression with Bootstrap validation was used to select key features. A binary logistic regression model was then constructed to discriminate AS from CHD. Model performance was assessed by the area under the curve (AUC), 5-fold cross-validation, calibration curve, and the Hosmer-Lemeshow test. **Results** Significant differences were observed between the AS and CHD groups in age and cardiac function parameters, including N-terminal pro B-type natriuretic peptide (NT-proBNP) and left ventricular ejection fraction (LVEF) ( $P<0.05$ ). The model incorporated five MCG parameters: the mean negative magnetic pole eccentricity in the RS segment, the magnetic pole dispersion at the R-wave peak, the magnetic dipole center trajectory distribution in the QR segment, the mean dipole moment in the TT segment, and the magnetic field angle at the T-wave peak. It achieved an AUC of 0.881 (95%CI 0.817 - 0.946) in the complete dataset, with 84.68% sensitivity and 80.00% specificity. The mean AUC from cross-validation was 0.836. No significant calibration deviation was found (Hosmer-Lemeshow test,  $P=0.228$ ). **Conclusions** A model based on specific MCG parameters effectively differentiates AS from CHD by quantifying distinct electrophysiological patterns, offering a novel insight for the etiological diagnosis of angina pectoris.

**[Key words]** aortic stenosis; coronary heart disease; magnetocardiography; myocardial ischemia

主动脉瓣狭窄(aortic stenosis, AS)是一种常见的瓣膜性心脏病,重度AS患者可出现劳力性心绞痛,与冠心病(coronary heart disease, CHD)患者相似<sup>[1]</sup>。因两者的治疗策略存在本质差异<sup>[2-3]</sup>,核心临床决策在于明确心肌缺血的机制,区分瓣膜狭窄所致的心肌氧供失衡与由冠脉狭窄导致的心肌灌注减少。此外,由于AS会干扰冠状动脉的血流动力学<sup>[4,5]</sup>,使单纯进行传统的冠脉解剖评估难以准确识别功能性缺血的存在;而且目前无法衡量对于有临床意义的心肌缺血中,瓣膜狭窄存在的具体贡献。

心磁图(magnetocardiography, MCG)采用磁力计阵列探测由心脏生物电活动所诱发的微弱的生物磁场信号<sup>[6-7]</sup>,当心肌发生缺血或重构时,其结构与功能会产生异常,使细胞电位发生变化,进而引起体外可测磁场的变化<sup>[8]</sup>。因此,MCG具备捕捉不同机制触发的细微心肌电-机械活动异常信号的潜力,这一特性是探索AS与CHD电生理差异的关键所在。本研究以CHD患者作为对照,初步探索MCG区分AS患者与阻塞性CHD患者的效能,旨在识别AS在MCG的特征性表现,并探究MCG在评估AS心肌电-机械活动异常的潜在价值。

## 1 资料与方法

**1.1 研究对象** 本研究为单中心、前瞻性队列研究。于2023年10月—2025年12月在解放军总医院第一医学中心连续招募的556例可疑心肌缺血的患者。纳入标准:(1)年龄 $\geq 18$ 岁;(2)存在提示心肌缺血的相关临床表现(典型或不典型心绞痛、胸闷等)和(或)客观证据(如心电图提示ST-T改变等)。排除标准:(1)急性或陈旧性心肌梗死;(2)各类心肌病;(3)重度瓣膜反流;(4)失代偿性心力衰竭;(5)复杂心律失常(如Ⅲ度房室传导阻滞、室上性心动过速等);(6)存在冠状动脉造影(coronary angiography, CAG)检查

禁忌;(7)任何可能干扰MCG信号采集与分析的因素。本研究已获解放军总医院医学伦理委员会的审批(S2022-023-01),并在中国临床临床试验注册中心注册(注册号:ChiCTR2300074399)。

**1.2 样本量估算** 本研究因缺乏可参考的效应量数据,无法进行传统样本量估算。基于解放军总医院第一医学中心既往诊疗数据,连续纳入研究周期内所有符合标准的中重度AS患者(约30例)作为观察组,同期纳入临床队列中符合标准的CHD患者作为对照组,该样本量主要基于临床可行性确定,旨在完成初步探索。

**1.3 主要检查方法** 所有患者需在入院后行CAG前完成经胸超声心动图(transthoracic echocardiography, TTE)和MCG检查。

**1.3.1 CAG检查及默里定律的定量流量比值(murray-law-based quantitative flow ratio,  $\mu$ QFR)的计算** CAG由至少两名心血管内科副主任医师采用Phillip Allura Xper FD20数字减影血管造影机完成。基于 $\mu$ QFR的测量采用AngioPlus Core软件(版本2.1.1.0,上海博动医疗科技股份有限公司)进行分析。将CAG图像传输到AngioPlus系统,选择舒张末期造影剂充盈最佳的一帧开始分析,沿着目标血管入口起始端至远端结束的路径进行标记。依据Murray分叉定律,生成与实际血管形态匹配的参考管腔模型,通过对比狭窄病变处与参考直径的血流压力比值,计算 $\mu$ QFR数值。

**1.3.2 TTE检查** 采用超声诊断仪(SC2000,探头频率2~4 MHz,美国Siemens公司)行超声心动图检测,主要评估指标包括:主动脉瓣平均跨瓣压差、主动脉瓣峰值流速、左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)等。

**1.3.3 MCG检查与参数提取** 采用由9通道低温超导量子干涉仪MCG系统[型号MD-U092001;漫迪医



疗仪器(上海)有限公司]在非磁屏蔽室内采集。患者取仰卧位,由操作者借助定位标记线与激光指示器对患者体位进行调整,确保心脏区域在探测器的有效感应区域内。检查时,探测区域覆盖胸前20 cm×20 cm范围,在该区域内进行4次共36个点位的完整扫描,每次持续40 s。记录时,同步采集体表心电图II导联作为参考信号。

检查完成后,以同步记录的心电图为基准,系统对多周期信号进行自动识别,剔除波形畸变或干扰严重的异常周期,利用选择平均的方式,获得每个测点的平均单周期MCG信号,最后共同构成该患者的空间波组图。最后,采集的所有数据上传至漫迪医疗仪器有限公司的数据库。数据分析人员对患者的临床信息不知情。基于36个通道的平均MCG信号,系统通过计算平均全场功率,识别代表心室除极的QRS复合波和代表心室复极的TT间期,将这一除极-复极过程所对应的心动周期时段分为24帧以追踪动态变化,同时生成系列磁场图,由两名数据分析人员盲法提取覆盖整个心动周期的84个参数。

**1.4 结局变量** 结局变量为疾病类型(AS或CHD),并按疾病类型将患者分为AS组与CHD组。参考2017年美国超声心动图学会/欧洲心血管影像协会共同发布的超声心动图评估AS指南<sup>[9]</sup>,将主支冠脉 $\mu\text{QFR}$ 均 $>0.8$ 且主动脉瓣口面积 $\leq 1.5\text{ cm}^2$ ,或跨瓣峰值流速 $\geq 3.0\text{ m/s}$ ,或平均跨瓣压差 $\geq 20.0\text{ mmHg}$ 的患者作为AS组;将排除瓣膜性心脏病且任一主支冠脉狭窄 $\geq 50\%$ 及 $\mu\text{QFR}\leq 0.8$ 的患者作为CHD组<sup>[10-11]</sup>。

**1.5 预测变量** 预测变量为MCG参数,主要涵盖以下5个方面的指标。(1)磁极离散度与形态:分析磁极区在空间中的离散程度(取正负极较大值)与几何形态的稳定性特征,如R波峰磁极离散度( $R_{\text{dis}}$ )、RS段负磁极离心率平均值( $RS_{\text{enav}}$ );(2)磁极角:反映心动周期中特定时刻电磁场的主导方向,如T波峰磁场角度( $TT_{\text{a}}$ );(3)磁极角度变化:表示磁极在特定时间间隔内从正极到负极的动态旋转,如TT段最大逆时针跳转角度( $TT_{\text{nm}}$ );(4)磁场矢量积分:定量分析心磁场在空间中的主方向上的磁场强度随空间位置的分布特征,如QR段心磁矢量面积(基于幅值)( $QR_{\text{areaf}}$ );(5)偶极子参数:瞬时状态参数,包括偶极矩强度,用于分析心脏等效电源的强度,如TT段偶极矩平均值( $TT_{\text{didav}}$ );动态特性参数,包括中心轨迹距离,指特定时段内偶极子中心点连续移动的空间路径累积长度,如QR段偶极子中心轨迹距离( $QR_{\text{died}}$ )。

**1.6 特征参数的筛选、模型构建与评估**

**1.6.1 特征参数筛选与模型构建** 因AS组样本量有

限,未划分独立的训练集与外部验证集,最终纳入的141例患者均用于模型开发。以疾病类型为因变量(以AS为阳性事件),MCG参数为自变量,使用加权最小绝对值收缩和选择算子(least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)对84个参数进行特征筛选,使用10折交叉验证确定最优惩罚参数 $\lambda_{\text{min}}$ ,并联合1000次Bootstrap重抽样评估各变量的稳定性比例,将稳定性比例 $\geq 80\%$ 的变量纳入后续建模。将筛选出的预测因子纳入多因素二元logistic回归模型,构建AS与CHD的鉴别模型。

**1.6.2 模型评估** 采用受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下面积(area under the curve, AUC)评估模型的区分能力,采用最大约登指数的原则确定最佳概率阈值,在该最佳阈值下,计算敏感度、特异度等指标。采用5折交叉验证进行内部验证。计算Brier分数以综合评价模型预测概率的总体准确性,同时利用校准曲线及5折交叉验证框架下的Hosmer-Lemeshow拟合度检验评估校准度。

**1.7 统计学处理** 采用R软件(版本4.3.2)进行统计分析。计量资料符合正态分布者以 $\bar{x}\pm s$ 表示,两组间比较采用两独立样本 $t$ 检验,不符合正态分布者以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,组间比较采用Mann-Whitney  $U$ 检验。计数资料以例(%)表示,组间比较采用 $\chi^2$ 检验或Fisher确切概率法。多因素二元logistic回归结果以比值比(odd ratio, OR)及其95%置信区间(confidence interval, CI)表示。所有检验均为双侧检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结 果

**2.1 研究流程及分组结果** 研究共招募556例成年可疑心肌缺血患者,根据纳入、排除标准,共排除415例,其中包括因主支冠脉 $\mu\text{QFR}>0.8$ 的CAD患者290例,合并重度主动脉瓣反流的AS患者3例,因图像质量、失代偿性心力衰竭等原因排除115例,最终纳入141例,其中AS患者30例、CHD患者111例;所有患者年龄为 $(63.9\pm 10.9)$ 岁,其中,男104例(73.8%)、女37例(26.2%)。具体筛选流程见图1。

**2.2 AS与CHD患者的基线资料** CHD患者的冠状动脉病变分布如下:根据解剖学狭窄的定义,单支血管病变45例(40.5%),双支血管病变45例(40.5%),三支血管病变21例(18.9%);根据 $\mu\text{QFR}$ 定义的冠状动脉狭窄所致的心肌缺血,单支血管病变74例(66.7%),双支血管病变29例(26.1%),三支血管病变8例(7.2%)。比较AS组与CHD组患者的临床基线特征的差异,结果显示,与CHD组比较,AS组的年龄较大( $P<0.001$ ),肌酐、肌钙蛋白T、N末端B型利钠

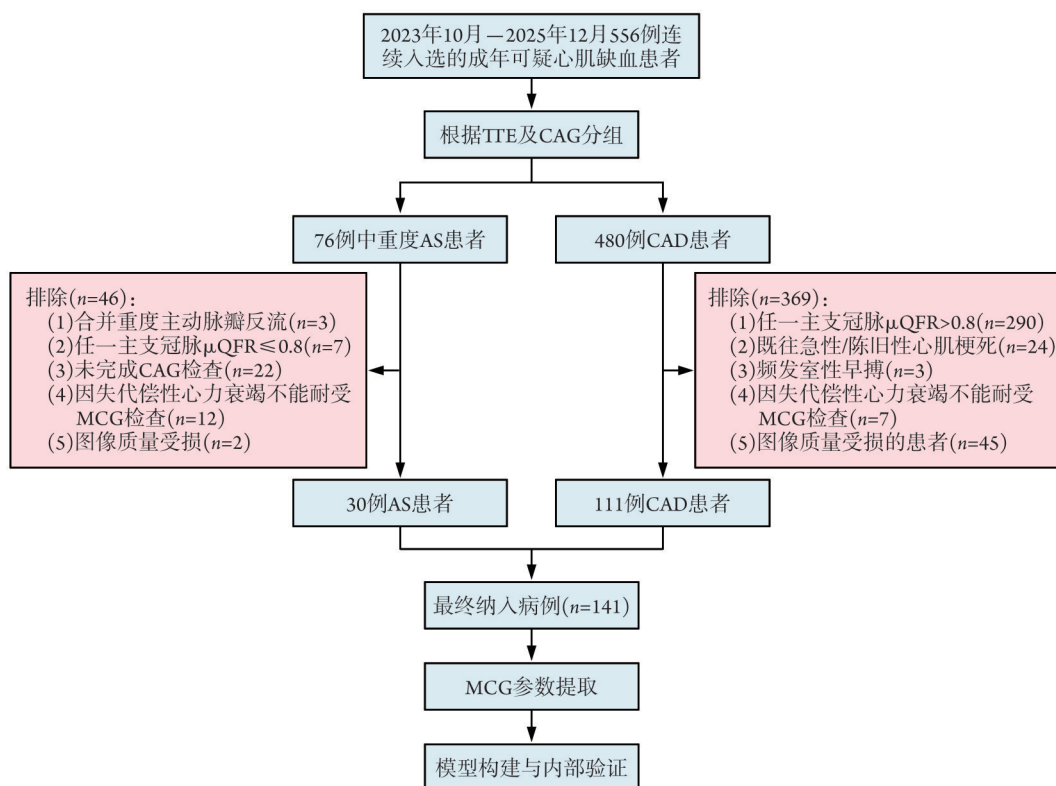


图1 研究对象纳入、排除流程图

Fig.1 Flowchart of participant enrollment and exclusion

TTE. 经胸超声心动图; CAG. 冠状动脉造影; AS. 主动脉瓣狭窄; CHD. 冠心病;  $\mu$ QFR. 基于默里定律的定量流量比; MCG. 心磁图

肽前体(N-terminal pro B-type natriuretic peptide, NT-proBNP)水平升高( $P<0.001$ ), 室间隔厚度和左室后壁厚度增厚( $P<0.001$ ), 左房前后径( $P<0.001$ )、左室收缩末内径( $P=0.012$ )和左室收缩末容积( $P=0.006$ )增大, LVEF 降低( $P=0.001$ ), 冠脉平均  $\mu$ QFR 增大( $P<0.001$ ), 差异均有统计学意义; 但两组患者在性别、体重指数(body mass index, BMI)、血红蛋白、左室舒张末内径、左室舒张末容积、二尖瓣口舒张早期与晚期血流速度比值(early to late diastolic transmitral flow velocity, E/A)及高血压、糖尿病、高脂血症、慢性肾功能不全、吸烟的占比等方面差异无统计学意义( $P>0.05$ )(表1)。

**2.3 基于LASSO回归的变量筛选** 为聚焦于MCG参数的鉴别价值, 研究仅以MCG参数为自变量, 疾病类型为因变量, 通过加权LASSO回归结合Bootstrap稳定性验证对提取的84个MCG参数进行筛选及交叉验证, 选取 $\lambda_{\min}$ , 共筛选出5个变量(图2)。再将这5个变量纳入二元logistic回归分析, 建立疾病特征差异探索模型, 结果显示, RS段负磁极离心率平均值( $RS_{\text{enav}}$ ,  $OR=0.641$ , 95%CI 0.433~0.915)、QR段偶极子中心轨迹距离( $QR_{\text{dicd}}$ ,  $OR=0.971$ , 95%CI 0.954~0.987)和T波峰磁场角度( $TT_{\text{ta}}$ ,  $OR=0.992$ , 95%CI 0.988~0.997)与AS呈独立负相关; R波

峰磁极离散度( $R_{\text{dis}}$ ,  $OR=1.291$ , 95%CI 1.124~1.602)和TT段偶极矩平均值( $TT_{\text{didav}}$ ,  $OR=1.141$ , 95%CI 1.061~1.240)与AS呈独立正相关(表2)。

**2.4 MCG参数模型对鉴别AS与CHD的效能评估** 以上5个参数之间均不存在多重共线性。根据模型对AS与CHD电磁特征差异进行探索, 并绘制ROC曲线(图3), 模型在完整数据集展现出良好的判别能力( $AUC=0.881$ , 95%CI 0.817~0.946), 根据约登指数得出最佳截断值为0.743, 此时敏感度为84.68%, 特异度为80.00%。同时, 采用5折交叉验证法进行内部验证结果显示, 模型在内部验证集的AUC为0.836(95%CI 0.757~0.914), 较完整数据集AUC下降, 提示存在一定程度的乐观估计, 但仍处于可接受范围, 根据约登指数得出最佳截断值为0.634, 此时敏感度为86.54%, 特异度为70.00%。

在完整数据集上, Brier分数为0.109, 交叉验证框架的平均Brier分数为0.124, 各折波动于0.064~0.208(标准差为0.073), 提示模型概率预测的总体准确性尚可, 但稳定性受到样本量限制有所下降。基于交叉验证合并样本绘制的校准曲线的校准斜率为0.73, 截距为-0.24, 表明模型倾向于输出保守的概率估计, 有助于在不显著增加假阳性的情况下识别高危AS患者(图4)。整体Hosmer-Lemeshow拟合度检



表 1 两组患者基本资料比较  
Tab.1 Comparison of baseline data between two groups

| 项目                                                    | 总计(n=141)           | AS组(n=30)            | CHD组(n=111)         | P      |
|-------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------|
| 人口学资料                                                 |                     |                      |                     |        |
| 性别[例(%)]                                              |                     |                      |                     | 0.446  |
| 男                                                     | 104(73.8)           | 20(66.7)             | 84(75.7)            |        |
| 女                                                     | 37(26.2)            | 10(33.3)             | 27(24.3)            |        |
| 年龄(岁, $\bar{x}\pm s$ )                                | 63.9 $\pm$ 10.9     | 72.6 $\pm$ 9.0       | 61.5 $\pm$ 10.2     | <0.001 |
| BMI(kg/m <sup>2</sup> , $\bar{x}\pm s$ )              | 24.9 $\pm$ 3.1      | 24.7 $\pm$ 3.2       | 25.0 $\pm$ 3.1      | 0.666  |
| 心血管危险因素[例(%)]                                         |                     |                      |                     |        |
| 高血压                                                   | 90(63.8)            | 19(63.3)             | 71(64.0)            | >0.999 |
| 糖尿病                                                   | 47(33.3)            | 13(43.3)             | 34(30.6)            | 0.275  |
| 高脂血症                                                  | 37(26.2)            | 8(26.7)              | 29(26.1)            | >0.999 |
| 慢性肾功能不全                                               | 2(1.4)              | 1(3.3)               | 1(0.9)              | 0.897  |
| 吸烟                                                    | 58(41.1)            | 12(40.0)             | 46(41.4)            | >0.999 |
| 实验室检查                                                 |                     |                      |                     |        |
| 肌酐[ $\mu$ mol/L, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )] | 43.4(40.6, 47.0)    | 80.0(70.4, 88.3)     | 42.2(39.9, 44.5)    | <0.001 |
| 血红蛋白[g/L, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]        | 136.0(126.0, 147.0) | 131.5(119.0, 141.8)  | 136.0(129.0, 147.0) | 0.050  |
| 肌钙蛋白 T[ng/ml, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]    | 0.009(0.007, 0.014) | 0.018(0.011, 0.026)  | 0.009(0.006, 0.012) | <0.001 |
| NT-proBNP[pg/ml, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )] | 83.4(23.9, 342.5)   | 984.3(242.8, 2246.3) | 51.8(18.7, 122.3)   | <0.001 |
| 超声心动图                                                 |                     |                      |                     |        |
| 室间隔厚度[mm, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]        | 11.0(10.0, 12.0)    | 13.0(12.0, 14.0)     | 11.0(10.0, 11.0)    | <0.001 |
| 左室后壁厚度[mm, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]       | 11.0(10.0, 11.0)    | 11.5(10.0, 12.0)     | 10.0(9.0, 11.0)     | <0.001 |
| 左房前后径[mm, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]        | 35.0(32.0, 38.0)    | 39.0(37.0, 45.0)     | 35.0(32.0, 37.0)    | <0.001 |
| 左室舒张末内径[mm, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]      | 44.0(41.0, 47.0)    | 46.0(40.3, 48.8)     | 44.0(41.0, 46.0)    | 0.087  |
| 左室收缩末内径[mm, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]      | 29.0(26.0, 31.0)    | 31.0(27.0, 34.0)     | 29.0(26.0, 31.0)    | 0.012  |
| 左室舒张末容积[mm, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]      | 89.0(75.0, 102.0)   | 95.5(76.5, 114.0)    | 87.0(75.0, 99.0)    | 0.094  |
| 左室收缩末容积[mm, M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]      | 33.0(26.0, 40.0)    | 40.5(28.0, 48.8)     | 32.0(26.0, 38.0)    | 0.006  |
| E/A[M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]              | 0.74(0.62, 0.89)    | 0.75(0.57, 1.03)     | 0.73(0.63, 0.84)    | 0.986  |
| LVEF[% , M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]         | 62.0(58.0, 66.0)    | 58.5(55.3, 61.5)     | 63.0(59.0, 66.0)    | 0.001  |
| 冠状动脉生理学指标                                             |                     |                      |                     |        |
| 平均 $\mu$ QFR[M(Q <sub>1</sub> , Q <sub>3</sub> )]     | 0.80(0.71, 0.88)    | 0.93(0.92, 0.96)     | 0.76(0.69, 0.84)    | <0.001 |

BMI. 体重指数, CK. 肌酸激酶, NT-proBNP. N 末端 B 型利钠肽前体, E/A. 二尖瓣血流早期与晚期充盈速度比值, LVEF. 左心室射血分数,  $\mu$ QFR. 基于默里定律的定量流量比

验未发现显著校准偏差( $\chi^2=10.56$ , 自由度=8,  $P=0.228$ ), 但各折交叉验证的校准指标变异较大(校准斜率波动在 0.26~3.07, 截距波动在 -0.78~2.05)。

3 讨 论

CHD 缺血的病理基础是动脉粥样硬化斑块<sup>[12]</sup>; AS 则是因左室后负荷增加导致的冠状动脉血流储备受损, 呈弥漫性、跨壁性缺血表现<sup>[13-14]</sup>。临床上二者常合并存在, 均可表现为心绞痛, 但 AS 可显著增加患者发生心力衰竭的风险<sup>[15]</sup>, 同时若将 AS 误诊为 CHD 后给予硝酸酯类药物等治疗, 可能会诱发严重的血流动力学恶化<sup>[16]</sup>。因此, 亟须一种理想的评估手段用于辅助鉴别两种不同病因所致的心肌缺血。

MCG 作为一种无辐射的无创检测手段, 其信号

在穿透人体组织时不发生显著衰减或畸变, 使其对心内膜下电流尤为敏感, 任何能够引发心脏结构与功能改变的疾病, 理论上都存在通过分析 MCG 信号而被识别的潜在可能。而目前 MCG 相关的研究多集中于 CHD<sup>[17]</sup>, 利用 MCG 评估 AS 所致心肌缺血方面的研究鲜有报道。

本研究采用加权 LASSO 回归筛选出 5 个用于鉴别 AS 与 CHD 疾病特征的关键变量, 基于此构建的模型在 5 折交叉验证框架下的 AUC 为 0.836(95%CI 0.757~0.914), 敏感度为 86.54%, 特异度为 70.00%。AS 组在这些关键变量上呈现一致性偏移趋势, 而 CHD 组分布离散, 提示 AS 具有共性相对较强的电生理改变。AS 的弥漫性心肌重构导致电传导不同步<sup>[18]</sup>, 在 MCG 上表现为 QR<sub>dicd</sub> 与 AS 呈负相关, 提示

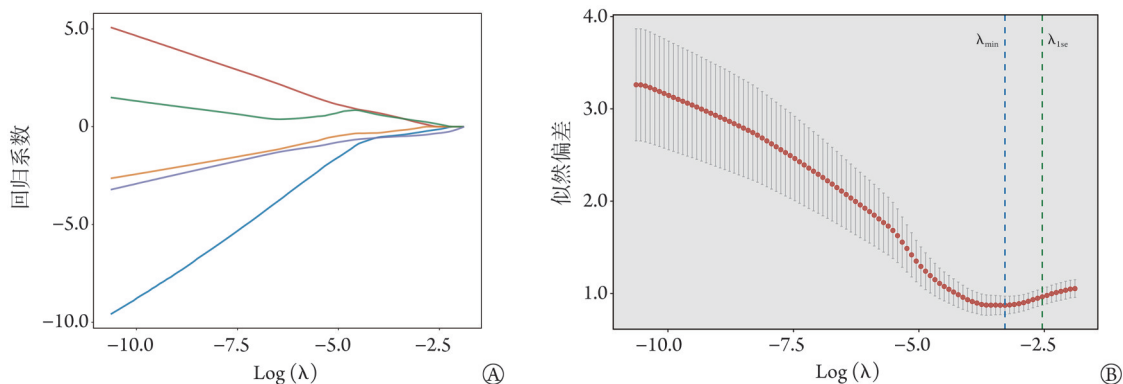


图2 基于加权LASSO回归结合Bootstrap稳定性选择区分AS与CHD患者的MCG特征变量筛选过程  
Fig.2 Screening process of MCG feature variables for discriminating between AS and CHD patients based on weighted LASSO regression combined with Bootstrap stability selection

A. 各变量回归系数随 $\lambda$ 变化的动态轨迹图。随着惩罚项 $\lambda$ 的增加,某些变量的系数逐步归零,所以这些变量从模型中被移除;越重要的变量,惩罚项对变量系数的影响越小;图中不同颜色的线代表不同的变量。B. 10折交叉验证图。图中两条虚线分别表示 $\lambda_{\min}$ 及 $\lambda_{1se}$ , $\lambda_{\min}$ 表示模型误差最小时的 $\lambda$ 值, $\lambda_{1se}$ 表示模型误差一个标准误差范围内的 $\lambda$ 值,选取 $\lambda_{\min}=0.0374$ 作为最佳 $\lambda$ 值,在该 $\lambda$ 取值下,纳入模型的变量个数更少。LASSO.最小绝对值收缩和选择算子;AS.主动脉瓣狭窄;CHD.冠心病;MCG.心磁图

表2 心磁图(MCG)探索AS和CHD差异的多因素二元logistic回归分析

Tab.2 Multivariate binary logistic regression analysis of differences between AS and CHD using magnetocardiography (MCG)

| 心磁图参数        | $\beta$ | SE    | OR(95%CI)          | P      |
|--------------|---------|-------|--------------------|--------|
| RS段负磁极离心率平均值 | -0.444  | 0.189 | 0.641(0.433~0.915) | 0.019  |
| R波峰磁极离散度     | 0.255   | 0.087 | 1.291(1.124~1.602) | 0.003  |
| QR段偶极子中心轨迹距离 | -0.029  | 0.009 | 0.971(0.954~0.987) | <0.001 |
| TT段偶极矩平均值    | 0.132   | 0.039 | 1.141(1.061~1.240) | <0.001 |
| T波峰磁场角度      | -0.008  | 0.002 | 0.992(0.988~0.997) | <0.001 |

AS.主动脉瓣狭窄;CHD.冠心病

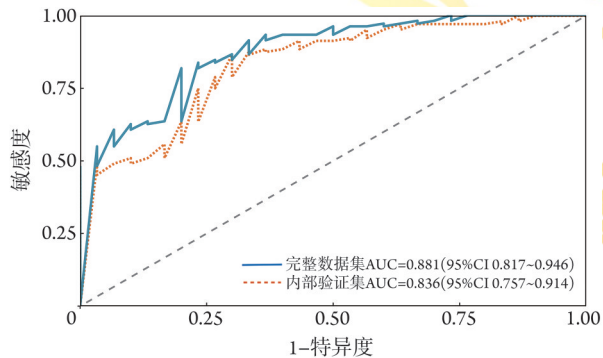


图3 心磁图(MCG)模型探索AS与CHD差异的ROC曲线  
Fig.3 ROC curves of the magnetocardiography (MCG)-based model for differentiating AS from CHD

AS.主动脉瓣狭窄;CHD.冠心病

AS心肌的电活动在起始阶段即呈现空间动态模式的异常。RS<sub>enav</sub>呈特定分布模式则提示电传导高度分散,为心电图S波在反映AS相关左室肥厚中的诊断效能优于R波这一现象提供了潜在的三维电生理视角<sup>[19]</sup>。dis-R的升高可能反映其心肌缺血已进展到足以引起去极化期电流源空间离散度增加,与心电图观察到的碎裂QRS波所反映的时空异质性互为印

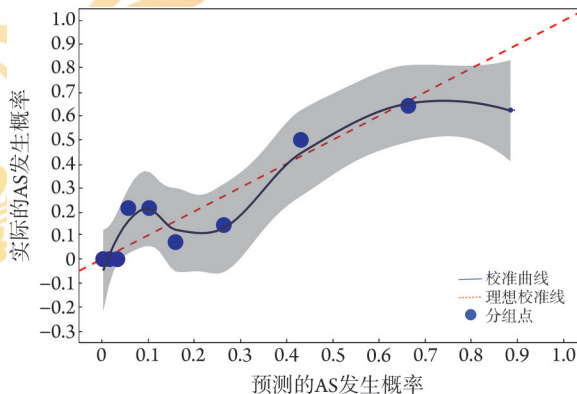


图4 基于5折交叉验证的AS与CHD鉴别模型的校准曲线图

Fig.4 Calibration curve of the AS versus CHD discrimination model based on 5-fold cross-validation

采用Bootstrap法(1000次重复抽样)计算校准曲线的95%CI(灰色阴影区域),该置信区间在预测概率的两端显著变宽,反映了小样本条件下,对极端风险概率进行估计时存在较大的抽样变异性。AS.主动脉瓣狭窄;CHD.冠心病

证<sup>[20]</sup>。TT<sub>a</sub>作为定性指标,在本团队既往研究中与中重度冠状动脉狭窄风险正相关<sup>[21]</sup>;在本研究中,作为连续变量,CHD患者TT<sub>a</sub>分布较为分散,而AS

因室壁应力增加和毛细血管密度相对不足,造成心内膜下缺血,加剧了跨壁复极离散度<sup>[22-23]</sup>,因此AS患者的TT<sub>ta</sub>呈现向特定方向高度聚集的趋势(33.3%的患者角度值>300°),提示AS患者心室复极综合向量的空间角度可能发生更严重的偏移。同时,在控制了其他因素后,更高的TT<sub>didav</sub>是AS的独立预测因素,提示在复极期可能存在电流源产生的磁场信号平均幅度的改变。

综上,基于5个MCG参数,该探索性研究初步量化了AS与CHD的电生理差异,为心绞痛不同病因的鉴别提供了新线索。MCG检查所需时间短,有望发展为一种前置分诊工具,初步评估缺血病因,并优化诊断路径。但本研究仍存在以下局限性:(1)因AS患者对该疾病的认知局限导致就诊率偏低<sup>[24]</sup>,相比于CHD组,AS组样本量较小,导致模型稳健性不足,且缺乏外部验证队列;同时因AS组例数过少,无法采用合成少数过采样技术或类别权重调整;(2)AS组与CHD组基线心功能存在差异,同时未能将MCG参数与诊断心肌缺血的金标准进行关联验证,当前指标反映的更可能是AS所导致的包含缺血、肥厚及纤维化等共同构成的整体心肌电生理重构状态;(3)研究仅纳入单纯AS和单纯CHD,未涉及共病患者,差异参数在共病患者中的有效性等尚不明确。因此,下一步研究组将对MCG参数与评估心肌缺血的金标准进行对比,同时聚焦于具有复杂临床背景的患者亚组分析,扩大样本量以进一步验证MCG在心绞痛病因鉴别中的临床应用价值。

## 【参考文献】

- [1] Abdul-Rahman T, Lizano-Jubert I, Garg N, *et al.* The common pathobiology between coronary artery disease and calcific aortic stenosis: Evidence and clinical implications[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2023, 79: 89-99.
- [2] Praz F, Borger MA, Lanz J, *et al.* 2025 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease[J]. *Eur Heart J*, 2025, 46(44): 4635-4736.
- [3] Rao SV, O'Donoghue ML, Ruel M, *et al.* 2025 ACC/AHA/ACEP/NAEMSP/SCAI guideline for the management of patients with acute coronary syndromes: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on clinical practice guidelines[J]. *Circulation*, 2025, 151(13): e771-e862.
- [4] Michail M, Davies JE, Cameron JD, *et al.* Pathophysiological coronary and microcirculatory flow alterations in aortic stenosis[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2018, 15(7): 420-431.
- [5] Yones E, Gunn J, Iqbal J, *et al.* Functional assessment of coronary artery disease in patients with severe aortic stenosis: a review[J]. *Heart*, 2025, 111(6): 246-252.
- [6] Kwong JS, Leithäuser B, Park JW, *et al.* Diagnostic value of magnetocardiography in coronary artery disease and cardiac arrhythmias: a review of clinical data[J]. *Int J Cardiol*, 2013, 167(5): 1835-1842.
- [7] Fenici R, Brisinda D, Venuti A, *et al.* Thirty years of clinical magnetocardiography at the Catholic University of Rome: diagnostic value and new perspectives for the treatment of cardiac arrhythmias[J]. *Int J Cardiol*, 2013, 168(5): S113-S115.
- [8] Yoshida K, Inaba T, Horigome H, *et al.* Magnetocardiographic risk stratification in patients with Brugada-pattern ST-elevation[J]. *J Interv Card Electrophysiol*, 2024, 67(1): 35-37.
- [9] Baumgartner H, Hung J, Bermejo J, *et al.* Recommendations on the echocardiographic assessment of aortic valve stenosis: a focused update from the European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2017, 18(3): 254-275.
- [10] Ding D, Zhang J, Wu P, *et al.* Prognostic value of postpercutaneous coronary intervention murray-law-based quantitative flow ratio: post hoc analysis from FLAVOUR trial[J]. *JACC Asia*, 2025, 5(1): 59-70.
- [11] Kero T, Knuuti J, Bär S, *et al.* Coronary artery stenosis, plaque burden, and severity of myocardial ischemia[J]. *Eur Heart J Imaging Methods Pract*, 2025, 3(4): qyaf139.
- [12] Zaman S, Wasfy JH, Kapil V, *et al.* The Lancet Commission on rethinking coronary artery disease: moving from ischaemia to atheroma[J]. *Lancet*, 2025, 405(10486): 1264-1312.
- [13] Rajendran J, Ramu SK, Khuttan A, *et al.* Management of coronary artery disease in patients undergoing transcatheter aortic valve replacement[J]. *J Soc Cardiovasc Angiogr Interv*, 2025, 4(7): 103658.
- [14] Comella A, Michail M, Chan J, *et al.* Patients with aortic stenosis exhibit early improved endothelial function following transcatheter aortic valve replacement: The eFAST study[J]. *Int J Cardiol*, 2021, 332: 143-147.
- [15] Mengi S, Januzzi JL Jr, Cavalcante JL, *et al.* Aortic stenosis, heart failure, and aortic valve replacement[J]. *JAMA Cardiol*, 2024, 9(12): 1159-1168.
- [16] 中华医学会心血管病学分会,中国医师协会心血管内科医师分会,中国医师协会心力衰竭专业委员会,等.中国心力衰竭诊断和治疗指南 2024[J]. *中华心血管病杂志*, 2024, 52(3): 235-275.
- [17] Liu L, Pan Y, Gao H, *et al.* Predictive accuracy of magnetocardiography for diagnosing myocardial ischemia in NSTEMI-ACS patients with residual post-PCI angina[J]. *JACC Adv*, 2025, 4(9): 102073.
- [18] Lee HJ, Singh A, Lim J, *et al.* Diffuse interstitial fibrosis of the myocardium predicts outcome in moderate and asymptomatic severe aortic stenosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2025, 18(2): 180-191.
- [19] Budkiewicz A, Surdacki MA, Gamrat A, *et al.* Electrocardiographic versus echocardiographic left ventricular hypertrophy in severe aortic stenosis[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(11): 2362.
- [20] Panç C, Güler A, Doğan AC, *et al.* Fragmented QRS complex may predict long-term mortality after isolated surgical aortic valve replacement in patients with severe aortic stenosis[J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2022, 34(1): 26-32.
- [21] Cui JG, Tian F, Miao YH, *et al.* Accurate diagnosis of severe coronary stenosis based on resting magnetocardiography: a prospective, single-center, cross-sectional analysis[J]. *J Geriatr*



- Cardiol, 2024, 21(4): 407-420.
- [22] Tezcan M, Yiginer Ö, Doğan M, *et al.* A step forward parameter for the effects of transcatheter aortic valve implantation: transmural dispersion of repolarization[J]. J Geriatr Cardiol, 2015, 12(3): 326-328.
- [23] Avci Y, Demir AR, Bulut U, *et al.* Novel markers of ventricular repolarization are associated with mortality in patients undergoing surgical aortic valve replacement for severe aortic stenosis[J]. J Card Surg, 2021, 36(12): 4591-4596.
- [24] Gaede L, Di Bartolomeo R, van der Kley F, *et al.* Aortic valve stenosis: what do people know? A heart valve disease awareness survey of over 8,800 people aged 60 or over[J]. EuroIntervention, 2016, 12(7): 883-889.

(责任编辑: 张小利)

