

◁心脏、血管影像学▷

动态负荷 CT 心肌灌注成像与 CMR 对高血压患者
冠状动脉微循环障碍的评估价值玉苏甫·肉孜, 洪悦, 热亚提·阿布拉, 李林偲, 刘烁
(新疆维吾尔自治区人民医院放射影像中心, 新疆 乌鲁木齐 830001)

【摘要】目的:探讨动态负荷 CT 心肌灌注成像(CT-MPI)与心脏磁共振成像(CMR)评估高血压患者冠状动脉微循环障碍(CMD)的可行性。**方法:**纳入我院 2022 年 1 月—2023 年 6 月因疑似冠心病收治入院的高血压患者 64 例,行 CT-MPI、CMR、微血管阻力指数(IMR)检查,以 IMR>25 为 CMD 标准分为研究组和对照组,对比两组患者 CT-MPI、CMR 检查参数差异,采用 Pearson 相关性分析 CT-MPI、CMR 检查参数与 IMR 值的相关性,采用回归模型分析 CT-MPI 结合 CMR 检查参数预测值与 IMR 检测结果的一致性,采用 ROC 曲线分析 CT-MPI、CMR 及基于回归模型联合评估高血压患者发生 CMD 的价值。**结果:**研究组心肌灌注血流量(MBF)、心肌灌注血容量(MBV)、左室射血分数(LVEF)、最大上升斜率(Slop_{max})、峰值信号强度(SL_{peak})低于对照组,灌注达峰时间(TTP)、左室质量指数(LVMI)、左室舒张末期容积(LVEDV)、左室收缩末期容积(LVESV)、达峰时间(t_{peak})高于对照组,差异有统计学意义($P<0.05$);CT-MPI、CMR 各指标与 IMR 值显著相关,有统计学意义($P<0.05$);Logistic 回归模型预测值与 IMR 检测结果有良好的 consistency, 假阳性率 3.45%;ROC 曲线分析结果显示,MBF、MBV、LVMI、LVEF、LVEDV、SL_{peak} 六个指标敏感度<0.8,有较大的漏诊率;TTP、Slop_{max}、t_{peak} 三个指标敏感度和特异性均>0.8 有较高评估价值;CT-MPI 结合 CMR 基于 Logistic 回归预测敏感度=1.00,特异性=0.966,评估价值较高;CT-MPI 心肌 17 节段 MBF 结果显示,CMD 患者负荷态 4、5、7、10、15 节段 MBF 值低于静息态,以上节段或是 CMD 发生主要区域。**结论:**CT-MPI、CMR 可一定程度揭示 CMD 的存在,CT-MPI 结合 CMR 基于回归模型预测与 IMR 检测结果有良好一致性,对评估高血压患者 CMD 有较高价值。

【关键词】 高血压;冠状动脉循环;磁共振成像;体层摄影术,X 线计算机

【中图分类号】 R543.3;R544.1;R445.2;R814.42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1008-1062(2024)08-0557-06

DOI:10.12117/jccmi.2024.08.007

CT-MPI and CMR evaluation of coronary microcirculatory disorders and related factors in hypertensive patients

YUSUFU Rou-zi, HONG Yue, REYATI Abula, LI Lin-cai, LIU Shuo

(Radiography Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region People's Hospital, Urumqi 830001, China)

Abstract: Objective: Exploring the feasibility of using dynamic load CT myocardial perfusion imaging (CT-MPI) combined with cardiac magnetic resonance imaging (CMR) to evaluate coronary microcirculation disorders (CMD) in hypertensive patients. **Method:** Sixty-four hypertensive patients admitted to our hospital from January 2022 to June 2023 due to suspected coronary heart disease were included, using CT-MPI, CMR and IMR examinations, divide into study group and control group according to the CMD standard of IMR>25, compare the differences in CT-MPI and CMR examination parameters between two groups of patients, using Pearson correlation analysis to examine the correlation between CT-MPI and CMR parameters and IMR values, using regression models to analyze the consistency between CT-MPI combined with CMR to check parameter predictions and IMR detection results, the value of using ROC curve analysis to evaluate the occurrence of CMD in hypertensive patients using CT-MPI, CMR and regression model-based joint assessment. **Result:** The MBF, MBV, LVEF, Slop_{max} and SL_{peak} of the study group were lower than those of the control group, while TTP, LVMI, LVEDV, LVESV and t_{peak} were higher than those of the control group, with statistical significance($P<0.05$). CT-MPI and CMR indicators were significantly correlated with IMR values, with statistical significance ($P<0.05$). The predicted values of the logistic regression model have good consistency with the IMR detection results, the false positive rate is 3.45%. The ROC curve analysis results show that the sensitivity of six indicators, MBF, MBV, LVMI, LVEF, LVEDV and SL_{peak} is less than 0.8, indicating a high rate of missed diagnosis. The combination of CT-MPI and CMR based on logistic regression predicts a sensitivity of 1.00 and a specificity of 0.966, indicating high evaluation value. The CT-MPI myocardial 17 segment MBF results showed that the MBF values in the load state 4, 5, 7, 10 and 15 segments of CMD patients were lower than those in the rest state, and these segments may be the main regions of CMD occurrence. **Conclusion:** CT-MPI and CMR can reveal the existence of CMD to a certain extent. The combination of CT-MPI and CMR based on regression model prediction and IMR detection results has good consistency, and has high value in evaluating coronary microcirculation disorders in hypertensive patients.

Key words: Hypertension; Coronary Circulation; Magnetic Resonance Imaging; Tomography, X-Ray Computed

冠状动脉微循环障碍 (Coronary microvascular dysfunction, CMD) 是因冠状动脉微血管阻力异常导致的冠状动脉病变,可造成心肌灌注受损、心肌缺血^①。长期以来,关于冠心病的研究主要集中于心外膜大

[收稿日期] 2023-12-07;[修回日期] 2024-01-12

[作者简介] 玉苏甫·肉孜(1989-),男,维吾尔族,新疆乌鲁木齐人,主治医师。E-mail:y13999138764@qq.com

[通信作者] 刘烁,新疆维吾尔自治区人民医院放射影像中心,830001。E-mail:58557458@qq.com

[基金项目] 新疆维吾尔自治区自然科学基金(编号:2022D01C639)。

血管,近年相关研究证实 CMD 也是冠心病的重要发病因素,在高血压患者中尤为普遍^[2-3]。微血管阻力指数 (Index of microvascular resistance,IMR) 是目前评估 CMD 的金标准,但 IMR 检测为有创检查,存在风险较高、操作难度较大、费用高等局限性,不少医院无法进行 IMR 检测^[4]。近年,动态负荷 CT 心肌灌注成像(CT-MPI)技术得到迅速发展,在定量观察心肌灌注指标上表现优异,可较好的鉴别冠状动脉微循环血管阻塞,但其检测评估指标基于血流显影速度实现,易受心率、心动周期、灌注压和推注速度的干扰影响准确性^[5]。此外,部分研究采用心脏磁共振成像(CMR),通过解剖结构、组织形态及心肌灌注评估心脏功能,间接鉴别冠状动脉微循环情况,但冠状动脉微循环系统主要由直径 $<300\ \mu\text{m}$ 的微血管组成,通过 CMR 评估冠状动脉微循环状态结果准确性不足^[6]。为此,本研究以我院 2022 年 1 月—2023 年 6 月行冠脉造影并应用 CT-MPI、CMR 及 IMR 检查的患者 64 例为样本,探索基于回归模型纳入 CT-MPI 结合 CMR 指标诊断高血压患者 CMD 的可行性。

1 材料与方法

1.1 研究对象

收集我院 2022 年 1 月—2023 年 6 月因胸痛、胸闷等症状疑似冠心病入院的高血压患者作为研究对象,IMR >25 为研究组,IMR ≤ 25 为对照组^[7]。纳入标准:①年龄 $>45\sim 80$ 岁;②经临床检查确诊为高血压且按规范流程接受降压治疗;③经造影检查冠状动脉血管无严重异常,狭窄率 $<50\%$;④均行 CT-MPI、CMR、IMR 检查,检查参数完整。

排除标准:①资料不全患者;②有心肌梗死病史、风湿性心脏病、心肌病、先天性心脏病、瓣膜病等其它心脏疾病患者;③既往有冠脉介入手术、冠状动脉内球囊扩张术、冠状动脉旁路移植手术史者;④对比剂过敏者;⑤肝肾功能障碍患者;⑥冠状动脉造影有冠状动脉痉挛者。

1.2 方法

1.2.1 一般资料收集

收集患者性别、年龄、体质量指数(BMI)、空腹血糖、糖化血红蛋白、总胆固醇、高密度脂蛋白、低密度脂蛋白、肌酐等指标。

1.2.2 CT-MPI 指标与收集方法

采用 Siemens Somatom 第 2 双源光子 CT 为动态负荷 CT-MPI 扫描设备,标准前瞻性心电门控扫描方式,100 kV 管电压,自动调制管电流技术,探测器 $64\times 0.625\ \text{mm}$,图像间重叠 10%。先行常规 CCTA 静息动态扫描,记录收缩末期图像,再采用三磷酸腺

苷二钠药物负荷以 $140\ \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 经左肘前静脉泵入,行动态穿梭模式扫描获取收缩末期图像。扫描数据通过 Siemens 工作站重建心肌灌注图,层厚 3 mm,层间隔 2.9 mm。根据美国 AHA 心脏学会 17 节段标准进行心肌灌注节段分析,采用斜率算法测算各低灌注区域心肌灌注血流量(MBF),采用去卷积算法计算心肌灌注血容量 (MBV),计算灌注达峰时间 (TTP),并计算多个低灌注区取平均值,获得心肌灌注定量指标。

1.2.3 CMR 指标与收集方法

采用 Philips 3.0T 磁共振扫描仪,以 B-TFE 序列行心脏定位扫描,以 True FISP 序列行心脏电影扫描,采用 SENSE-TFE 序列 FFE 扫描技术,经肘静脉注射二亚乙基三胺五乙酸钆 ($0.2\ \text{mmol}/\text{kg}$),流速 5 mL/s,扫描注射同时进行,行首过灌注扫描,层厚 10 mm、层间距 10 mm。原始数据采用 CVI42 软件处理,由两名经验丰富的高年资心血管影像诊断医师,测量左室质量指数(LVMI)、左室射血分数(LVEF)、左室舒张末期容积 (LVEDV)、左室收缩末期容积 (LVESV),计算各节段最大上升斜率($\text{Slope}_{\text{max}}$)、达峰时间(t_{peak})、峰值信号强度(SL_{peak}),取 17 个节段平均值。

1.2.4 IMR 指标与收集方法

采用圣犹达 RadiAnalyzer Xpress 动脉生理检测仪进行 IMR 检测。先将带有压力-温度感受器的压力导丝校零,通过无侧孔的 5F 或 6F 指引导管送至冠状动脉口,校正温度成功后测量平均动脉压力(Pa),将压力导丝送至冠状动脉狭窄处远端至少 2/3 处,经指引导管快速($<0.25\ \text{ms}$)注射 3~5 mL 室温生理盐水,记录静息态下冠脉血管传导时间,重复 3 次取平均值。前壁静脉以 $140\ \mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 静脉泵入腺苷使冠状动脉血管达到最大充血状态,再次经指引导管快速注射 3~5 mL 室温生理盐水,记录最大充血状态下的远端压力(Pd)和传导时间(T_{mn}),重复 3 次取平均值。根据公式 $\text{IMR}=\text{Pd}\times T_{\text{mn}}$ 计算 IMR 值。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 25.0 统计分析软件进行统计分析。计数资料用(n(%))表示,符合正态分布的计量资料以 $\bar{x}\pm s$ 表示,偏态分布数据用中位数(四分位数间距)($m(P_{25}, P_{75})$)表示。两组患者间的数据比较,呈正态分布的数据采用独立样本 t 检验,偏态分布数据采用秩和检验,计数资料采用 χ^2 检验。采用 Pearson 相关性分析比较 CT-MPI、CMR 指标与 IMR 间的相关性。纳入与 IMR 显著相关的 CT-MPI、CMR 指标为自变量,以 CMR >25 为 CMR 发生标准,采用二元 Logistic 回归分析构建 CT-MPI 结合 CMR 指标诊断高血压患者是否发生 CMD 的数学模型,根据

CT-MPI、CMR 指标计算患者 CMD 概率，以概率 ≥ 0.5 为发生 CMD 标准，评估模型诊断性能。采用 ROC 曲线分析 CT-MPI、CMR 指标及回归概率对高血压患者发生 CMD 的评估价值， $P < 0.05$ 有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者一般资料比较

64 例患者中，男 34 例，女 30 例，经 IMR 检查患有 CMD 的患者 (IMR > 25) 共计 35 例纳入 CMD。CMD 组与非 CMD 组间，在性别、年龄、BMI 值、一般生化代谢指标上无显著差异 (均 $P > 0.05$)，在 IMR 值上存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.2 两组患者 CT-MPI、CMR 比较

两组患者 CT-MPI、CMR 指标比较结果见表 1。

CMD 组 MBF、MBV、LVEF、Slop_{max}、SL_{peak} 显著低于非 CMD 组，差异有统计学意义 (均 $P < 0.05$)；CMD 组 TTP、LVMI、LVEDV、LVESV、t_{peak} 显著高于非 CMD 组，差异有统计学意义 (均 $P < 0.05$) (图 1, 2)。

2.3 CT-MPI、CMR 指标与 IMR 间的相关性

CT-MPI、CMR 指标与 IMR 值间的相关性检验结果见表 2。IMR 值与 MBF、MBV、LVEF、Slop_{max}、SL_{peak} 呈负相关，与 TTP、LVMI、LVEDV、LVESV、t_{peak} 呈正相关，均 $P < 0.05$ 。

2.4 Logistic 回归分析

Logistic 回归分析结果见表 3。各指标在回归分析中均有统计学意义， $P < 0.05$ 。根据回归系数，建立 CT-MPI 结合 CMR 指标诊断高血压患者 CMD 风险模型：

$$Y = 22.380 - 0.126 \times \text{MBF} - 0.481 \times \text{MBV} + 1.952 \times$$

表 1 两组患者 CT-MPI、CMR 指标比较

| | CMD 组 | 非 CMD 组 | t | P |
|--------------------------|----------------|-----------------|---------|-------|
| MBF (mL/(100 mL·min)) | 86.171±15.646 | 136.611±27.901 | -9.113 | 0.000 |
| MBV (mL/100 mL) | 8.121±1.992 | 12.414±2.064 | -8.442 | 0.000 |
| TTP (ms) | 14.951±1.915 | 9.824±2.298 | 9.739 | 0.000 |
| LVMI (g/m ²) | 89.848±7.287 | 80.458±4.841 | 5.935 | 0.000 |
| LVEF (%) | 54.921±5.778 | 60.379±6.063 | -3.679 | 0.000 |
| LVEDV (mL) | 84.651±20.930 | 69.799±15.699 | 3.154 | 0.002 |
| LVESV (mL) | 37.164±14.989 | 29.916±8.717 | 2.300 | 0.025 |
| Slop _{max} | 58.872±14.564 | 124.801±27.819 | -12.165 | 0.000 |
| t _{peak} (ms) | 35.841±4.640 | 23.148±4.524 | 11.018 | 0.000 |
| SL _{peak} | 282.187±72.156 | 461.376±107.924 | -7.921 | 0.000 |

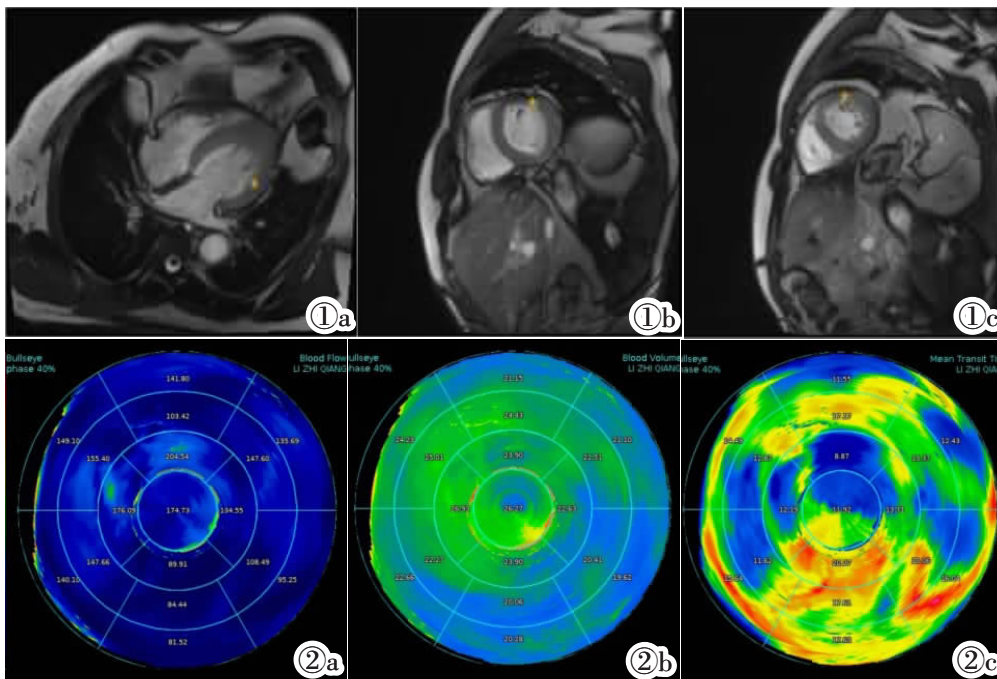


图 1, 2 男, 48 岁, 高血压合并 CMD 患者, 头痛伴血压高 2 年, 加重伴胸痛 1 月, 血压为 190/110 mmHg。图 1: CMR 图像, 可见患者心肌肥厚, 左心室室壁对称性增厚, 室间隔心肌纤维化明显。图 2: CT-MPI 图像, 可见患者左心室侧壁、下壁心肌多个节段 MBF 降低、MBV 降低、TTP 延长, 主要集中在侧壁、下壁心肌基底段、中间段、心尖段。图 2a: MBF 图; 图 2b: MBV 图; 图 2c: TTP 图。

Figure 1, 2. A 48 years old male with hypertension and CMD, headache accompanied by high blood pressure for 2 years, exacerbation accompanied by chest pain for 1

month, and blood pressure of 190/110 mmHg. Figure 1: CMR images show myocardial hypertrophy, symmetrical thickening of the left ventricular wall, and significant fibrosis of the interventricular septum in the patient. Figure 2: CT-MPI images show a decrease in MBF, reduced MBV, and prolonged TTP in multiple segments of the patient's left ventricular sidewall and inferior myocardium, mainly concentrated in the basal, intermediate, and apical segments of the sidewall and inferior myocardium. Figure 2a: MBF image. Figure 2b: MBV image. Figure 2c: TTP image.

$$TTP + 0.382 \times LVMI - 0.401 \times LVEF + 0.224 \times LVEDV + 0.284 \times LVESV - 0.128 \times Slop_{max} + 0.863 \times t_{peak} - 0.088 \times SL_{peak}$$

式中, Y 为 CMD 概率, 取值 0~1 之间, 值越大 CMD 风险越大, ≥ 0.5 可视为发生 CMD。根据构建的模型计算纳入研究患者 CMD 风险, 35 例 CMD 患者诊断值均 > 0.5 , 假阴性率 0.00%, 29 例非 CMD 患者有 1 例诊断值 > 0.5 , 假阳性率 3.45%。

2.5 ROC 曲线分析 CT-MPI、CMR 评估 CMD 的价值
LVESV 曲线下面积 (AUC) < 0.7 , $P > 0.05$, 对评估高血压患者发生 CMD 的价值较小; 其余指标 AUC > 0.7 , $P < 0.05$, 对评估高血压患者发生 CMD 有较大价值。其中, MBF、MBV、LVMI、LVEF、LVEDV、 SL_{peak} 六个指标敏感度 < 0.8 , 有较大的漏诊率, 仅可作为次要参考指标; TTP、 $Slop_{max}$ 、 t_{peak} 三个指标敏感度和特异性均 > 0.8 , 且 AUC 均 > 0.9 , 有较高的准确度和较低的误诊率、漏诊率, 可作为主要参考指标, 最佳临界值分别为 12.350、28.570、361.463。基于 CT-MPI 结合 CMR 指标的回归模型诊断预测值 AUC=0.999, 敏感度 1.00, 特异性 0.9666, 诊断性能优于单一指标, 最佳临界值 0.527, 以模型诊断概率 ≥ 0.527 为发

生 CMD 判断标准可提高诊断准确率, 与 IMR 检查结果有良好的一致性。ROC 曲线分析结果见表 4, CT-MPI、CMR 各指标评估高血压患者发生 CMD 的价值 ROC 曲线图见图 3。

2.6 CMD 组静息态、负荷态 17 节段 MBF 均值对比
见图 4。从对比结果看, 1、6、8、9、13、14、17 节段负荷态 MBF 均值比静息态明显升高; 12、16 节段 MBF 均值升高幅度较小; 2、3、4、5、7、10、11、15 节段负荷态 MBF 均值低于静息态。

3 讨论

冠脉微血管占冠脉循环血管总量的 95%, 心肌的供血和供氧依赖冠脉微循环完成^[7], 但至 2013 年欧洲心脏病学会才首次正式将 CMD 确定为心肌缺血疾病的发病机制之一, 目前还属于较新的研究领域, 且尚无可直接观察冠脉微循环的技术^[8]。《中国多学科微血管疾病诊断与治疗专家共识(2020)》中, 提出采用血管活性药物试验、影像学检查、IMR 测定多学科协作诊断的意见, 但最具诊断价值的正电子发射断层扫描、IMR 检测、血流储备检测技术存

表 2 CT-MPI、CMR 各指标与 IMR 之间的相关性

| | MBF | MBV | TTP | LVMI | LVEF | LVEDV | LVESV | $Slop_{max}$ | t_{peak} | SL_{peak} |
|---|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------------|------------|-------------|
| r | -0.674 | -0.716 | 0.660 | 0.497 | -0.394 | 0.303 | 0.289 | -0.789 | 0.731 | -0.628 |
| P | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.015 | 0.021 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

表 3 二元 Logistic 回归分析结果

| | B | S.E | Wals | Sig. | OR |
|--------------|--------|--------|-------|-------|-------|
| MBF | -0.126 | 8.128 | 0.817 | 0.002 | 0.403 |
| MBV | -0.481 | 9.821 | 0.695 | 0.001 | 0.501 |
| TTP | 1.952 | 16.033 | 1.812 | 0.000 | 1.246 |
| LVMI | 0.382 | 4.482 | 1.321 | 0.001 | 1.182 |
| LVEF | -0.401 | 22.401 | 0.263 | 0.004 | 0.307 |
| LVEDV | 0.224 | 6.598 | 1.969 | 0.001 | 1.324 |
| LVESV | 0.284 | 17.794 | 0.878 | 0.003 | 1.295 |
| $Slop_{max}$ | -0.128 | 4.777 | 1.088 | 0.002 | 0.594 |
| t_{peak} | 0.863 | 31.948 | 0.443 | 0.001 | 1.117 |
| SL_{peak} | -0.088 | 5.461 | 0.882 | 0.000 | 0.558 |
| 常量 | 22.380 | 92.802 | 2.831 | 0.000 | 5.241 |

表 4 CT-MPI、CMR 评估高血压患者 CMD 的 ROC 曲线分析结果

| | 面积 | Sig | 最佳临界值 | 敏感度 | 特异性 |
|--------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| MBF | 0.899 | 0.000 | 108.155 | 0.781 | 0.801 |
| MBV | 0.943 | 0.000 | 8.792 | 0.724 | 0.931 |
| TTP | 0.970 | 0.000 | 12.350 | 0.814 | 0.897 |
| LVMI | 0.848 | 0.000 | 84.305 | 0.743 | 0.793 |
| LVEF | 0.737 | 0.002 | 45.638 | 0.759 | 0.629 |
| LVEDV | 0.704 | 0.006 | 94.095 | 0.486 | 0.862 |
| LVESV | 0.631 | 0.074 | 35.475 | 0.543 | 0.793 |
| $Slop_{max}$ | 0.986 | 0.000 | 53.755 | 0.831 | 0.971 |
| t_{peak} | 0.989 | 0.000 | 28.570 | 0.843 | 0.931 |
| SL_{peak} | 0.901 | 0.000 | 361.463 | 0.695 | 0.971 |
| 模型诊断值 | 0.999 | 0.000 | 0.517 | 1.00 | 0.966 |

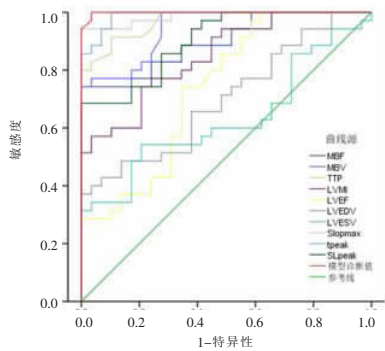


图 3 CT-MPI、CMR 评估高血压患者 CMD 发生的 ROC 曲线图。

Figure 3. ROC curve of CMD occurrence in hypertensive patients evaluated by CT-MPI and CMR.

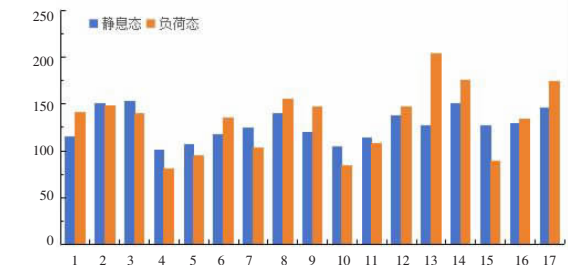


图 4 CMD 组静息态、负荷态 17 节段 MBF 均值对比。

Figure 4. Comparison of 17 segment MBF mean values between resting and load states in the CMD group.

在较大的经济、技术限制,难以在国内得到广泛应用^[7]。

CMR 具有良好的软组织对比分辨率,可从影像学上评估心脏结构和功能,临床上主要用于诊断心脏及大血管疾病^[9]。Sophie 等^[10]发现,利用心肌灌注首过效应及延迟显像技术,采用高分辨率 CMR 可间接评估冠脉微循环状态。Obkata 等^[11]研究中也得出类似结果,在高时间分辨率下,对比剂流入流出组织间隙过程的对比度变化可一定程度辨识冠脉微循环阻塞,并表现出显著的晚期钆增强。本研究得出与上述研究相似的结论,高血压 CMD 患者表现出明显的灌注延迟,灌注上升斜率和峰值信号降低。其原因,CMD 高血压患者与非 CMD 患者相比,微循环障碍导致存在更多的局部心肌灌注缺损^[12]。但单独以上述检测结果诊断 CMD 时敏感度低于 0.9,存在较高的假阴性率。其原因或与高血压患者普遍存在不同程度的心肌组织纤维化及微血管密度降低有关,导致 CMD 与非 CMD 患者间心肌灌注检测参数虽然存在差异,但还不足以明确提示冠脉微循环障碍的发生^[13]。

岑锦明等^[14]研究发现,CMD 患者与非 CMD 患者相比表现出严重的心脏舒张收缩功能受损,可通过射血分数、舒张收缩末期容积辅助评估冠脉微循环状态。本研究得出类似结果,高血压 CMD 患者 LVMI、LVESV、LVEDV 显著高于非 CMD 患者,LVEF 低于非 CMD 患者,但以射血分数、舒张收缩功能评估高血压患者是否发生 CMD 同样存在假阴性率过高问题。分析其原因,高血压患者心脏处于长期的超负荷工作状态,先行发生心肌肥厚和心肌重构及心室硬度增加,进而才造成微循环障碍,虽 CMD 患者心脏舒张收缩功能受损更严重,但差异不足以明确提示 CMD 的发生^[5]。

CT-MPI 是综合运用血管成像、药物负荷扫描和延迟强化扫描技术的心肌灌注成像技术,该技术具有极高的时间和空间分辨率,可敏感的通过血流动力学为心肌缺血状态,目前已有部分研究探索 CT-MPI 在 CMD 诊断方面的应用。吕宇航等^[16]采用中华小型猪为样本建模,对 CT-MPI 诊断 CMD 的价值展开研究发现,CT-MPI 可量化心肌血流灌注情况,静息态和负荷态对比可观察心肌组织负荷前后变化,CMD 建模后心肌 MBF、MBV 显著降低。Nardone 等^[17]对 CT-MPI 评估 CMD 展开临床研究得出相似结果,CMD 组心肌 MBF、MBV 显著低于正常组,用于评估 CMD 有较好的量化诊断效果。本研究采用 CT-MPI 观测 MBF、MBV、TTP 三个指标,研究结果与上述研究基本一致,在高血压 CMD 患者中,MBF、MBV 值显著低于非 CMD 患者,TTP 显著高于

非 CMD 患者。分析其原因,由于心肌供血依赖于微血管完成,CMD 患者存在更多的病变供血区,从而比非 CMD 患者心肌血流供应减少更严重^[18]。但同样,这一差异依然不足以明确提示 CMD 的发生,其原因或与高血压患者冠状动脉血流储备均较低有关。

考虑 CMR、CT-MPI 参数独立诊断 CMD 敏感度均有所不足,本研究以 IMR>25 为 CMD 标准,采用二元 Logistic 回归分析纳入 CMR、CT-MPI 参数建立回归模型,结果 CT-MPI 结合 CMR 基于回归模型计算出的预测值与 IMR 检测结果有良好的一致性,敏感度为 100%,特异性为 96.6%,明显降低了 CMR、CT-MPI 参数独立评估时过高的假阴性率,并降低了假阳性率。分析其原因,CT-MPI 与 CMR 参数结合,可全面评估患者心脏舒张收缩功能、心肌供血状态,通过回归分析能更准确的提取 CMD 与非 CMD 高血压患者间在心脏功能、心肌灌注缺损上的差异,从而提高了诊断准确度。

同时,本研究通过比较高 CMD 患者 CT-MPI 静息态和负荷态 MBF 检测结果还发现,患者心肌 17 节段中 4、5、7、10、15 节段负荷态 MBF 均值低于静息态,2、3、11、12、16 节段与负荷态与静息态均值 MBF 基本相当,或可提示 4、5、7、10、15 节段是高血压 CMD 患者微循环障碍发生的主要区域。分析其原因,在负荷态下由于腺苷的作用,正常微血管可扩张 2~3 倍,而发生病变的微血管扩张相对较小,正常微血管与病变微血管的扩张差异导致在负荷态下存在微循环障碍的灌注缺损区 MBF 比静息态更低的情况^[19]。高血压主要引起室间隔增厚,心肌纤维并联性增生,产生向心性肥厚,或主要导致左心室侧壁、下壁心肌基底段、中间段及心尖段微循环障碍^[20]。但由于未纳入正常人群进行对比研究,这一结果还需要进一步研究证实。此外,本研究纳入样本量较少,研究组与对照组间部分指标存在较大波动,较少的样本量下特异性患者对研究结果的干扰将被放大,还需进一步扩大样本量验证,以获得更可靠的研究结果。

CT-MPI 与 CMR 检查可评估心肌舒张收缩功能状态及心肌血流灌注状态,相关参数与冠状动脉 IMR 显著相关,间接评估冠状动脉微循环功能,但独立诊断假阴性率较高。CT-MPI 结合 CMR 基于回归模型,与以 IMR 诊断高血压 CMD 患者结果有良好的一致性,CT-MPI 静息态和负荷态心肌 17 节段 MBF 检测结果或可提示 CMD 的发生区域。

[参考文献]

- [1] Pruthi S, Siddiqui E, Smilowitz NR. Beyond coronary artery disease: assessing the microcirculation [J]. Interv Cardiol Clin, 2023,

- 12(1): 119-129.
- [2]彭熙,张慧平. 冠状动脉微循环疾病的研究现状[J]. 中国心血管杂志, 2022, 27(2): 187-191.
- [3]Perera D, Berry C, Hoole SP, et al. Invasive coronary physiology in patients with angina and non-obstructive coronary artery disease: a consensus document from the coronary microvascular dysfunction workstream of the British Heart Foundation/National Institute for Health Research Partnership [J]. *Heart*, 2022, 109(2): 88-95.
- [4]Pruthi S, Siddiqui E, Smilowitz NR. Beyond coronary artery disease: assessing the microcirculation [J]. *Cardiol Clin*, 2024, 42(1): 125-135.
- [5]任昌振,董士铭,胡博文,等. 射血分数保留型心力衰竭与冠状动脉微循环障碍[J]. 国际心血管病杂志, 2021, 48(1): 1-4.
- [6]Smilowitz NR, Toleva O, Chieffo A, et al. Coronary microvascular disease in contemporary clinical practice [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2023, 16(6): e012568.
- [7]Serruys PW, Kotoku N, Nrgaard BL, et al. Computed tomographic angiography in coronary artery disease [J]. *Eur Intervention*, 2023, 18(16): 1307-1327.
- [8]中国老年医学学会心血管病分会. 中国多学科微血管疾病诊断与治疗专家共识[J]. 中国循环杂志, 2020, 35(12): 1149-1165.
- [9]Dodd JD, Leipsic JA. Evolving developments in cardiac CT[J]. *Radiology*, 2023, 307(3): 2218-2261.
- [10]Sophie LV, Ornella R, Carsten T, et al. Coronary microvascular dysfunction in heart failure with preserved ejection fraction - adding new pieces to the jigsaw puzzle [J]. *Eur J Heart Fail*, 2020, 22(3): 442-444.
- [11]Yang JH, Obokata M, Reddy YNV, et al. Endothelium-dependent and independent coronary microvascular dysfunction in patients with heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Eur J Heart Fail*, 2020, 22(3): 432-441.
- [12]王岚,马玉良,王伟民,等. 老年急性心肌梗死后冠状动脉微循环障碍患者的临床特点及远期预后的研究 [J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2022, 24(6): 603-606.
- [13]于岩,曹军英,于馨,等. 超声心动图对冠心病合并重度缺血性二尖瓣反流治疗的近期疗效分析 [J]. 中国临床医学影像杂志, 2023, 34(4): 246-249.
- [14]岑锦明,熊卿圆,杨希立,等. 冠状动脉微循环阻力指数联合冠状动脉血流储备分数在稳定型心绞痛患者随访中的应用 [J]. 广东医学, 2021, 42(10): 1182-1187.
- [15]周宙,刘杨,王震. 全部窦性心搏 RR 间期标准差对伴缺血的非阻塞性冠状动脉疾病患者冠状动脉微循环功能障碍的预测价值 [J]. 中国循环杂志, 2022, 37(8): 804-809.
- [16]吕宇航,籍庆余,吕成,等. 多模态影像技术评价冠状动脉微循环障碍模型的实验研究 [J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(2): 196-202.
- [17]Nardone M, Miner S, McCarthy M, et al. Noninvasive microvascular indices reveal peripheral vascular abnormalities in patients with suspected coronary microvascular dysfunction[J]. *Canadian J Cardiol*, 2020, 36(8): 1289-1297.
- [18]余才贵,陈金玲,曹省,等. 心声学造影定量评估肥厚型心肌病患者左室心肌微循环功能 [J]. 中国超声医学杂志, 2022, 38(4): 465-469.
- [19]Yang S, Hoshino M, Koo BK, et al. Relationship of plaque features at coronary CT to coronary hemodynamics and cardiovascular events[J]. *Radiology*, 2022, 305(3): 578-587.
- [20]Tzimas G, Ryan DT, Murphy DJ, et al. Cardiovascular CT, MRI, and PET/CT in 2021: review of key articles[J]. *Radiology*, 2022, 305(3): 538-554.
- (上接 548 页)
- [6]黄萍,王鸿程,林晶,等. 超声引导下甲状腺结节细针穿刺 Bethesda 报告 I 型的影响因素分析[J]. 福建医药杂志, 2019, 41(1): 78-81.
- [7]郭宏恂,张冰洁,臧亚萍,等. 甲状腺结节超声引导下细针抽吸细胞学无法诊断结果的影响因素分析[J]. 临床超声医学杂志, 2014, (8): 523-526.
- [8]Haugen BR, Alexander EK, Bible KC, et al. 2015 American Thyroid Association Management Guidelines for Adult Patients with Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer: The American Thyroid Association Guidelines Task Force on Thyroid Nodules and Differentiated Thyroid Cancer [J]. *Thyroid*, 2016, 26(1): 1-133.
- [9]周伟,周丹,詹维伟,等. 超声引导下甲状腺结节细针穿刺抽吸活检术后出血原因分析[J]. 外科理论与实践, 2016, 21(2): 146-149.
- [10]Aydogan BI, Sahin M, Ceyhan K, et al. The influence of thyroid nodule size on the diagnostic efficacy and accuracy of ultrasound guided fine-needle aspiration cytology [J]. *Diagn Cytopathol*, 2019, 47(7): 682-687.
- [11]程将,葛晖. 超声引导下甲状腺小结节细针穿刺标本无法诊断的影响因素[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2021, 18(11): 1049-1053.
- [12]赵美丽,邵国强. 影响细针穿刺细胞学检测甲状腺癌准确度的超声特征分析[J]. 中国超声医学杂志, 2021, 37(3): 241-244.
- [13]毛倩仪,施倩,夏伟. 超声引导下细针穿刺与三种 TIRADS 联合对甲状腺结节良恶性的诊断价值比较 [J]. 中国临床医学影像杂志, 2023, 34(10): 696-700.
- [14]Xia JJ, Li MS, Zheng L, et al. Nondiagnostic cytological results on ultrasound-guided fine needle aspiration: does the thyroid nodule depth matter?[J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2017, 67(2): 115-124.
- [15]Kavanagh J, McVeigh N, McCarthy E, et al. Ultrasound-guided fine needle aspiration of thyroid nodules: factors affecting diagnostic outcomes and confounding variables [J]. *Acta Radiol*, 2017, 58(3): 301-306.
- [16]林雅芸,曹小丽,孙晓菁,等. 超声引导下甲状腺结节细针穿刺标本满意率影响因素分析 [J]. 中国超声医学杂志, 2020, 36(2): 109-112.
- [17]陈曦,陶玲玲,詹维伟,等. 超声引导下细针穿刺抽吸甲状腺结节标本质量的影响因素 [J]. 中国介入影像与治疗学, 2022, 19(8): 463-466.
- [18]Zhang L, Liu Y, Tan X, et al. Comparison of different-gauge needles for fine-needle aspiration biopsy of thyroid nodules[J]. *J Ultrasound Med*, 2018, 37(7): 1713-1716.
- [19]张中原,杨艳丽,王加林,等. 穿刺针型号及甲状腺结节超声特征对超声引导下细针穿刺活检标本取材满意率的影响 [J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2023, 43(8): 1140-1144.