

负荷动态 CT 心肌灌注血流量在无心肌缺血患者中的分布探讨

龙冰竹¹, 孔维芳^{1,2}, 许桢玉¹, 刘楚乔³, 李 方², 黄红云²

1. 电子科技大学医学院, 四川 成都 610054; 2. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)放射科, 四川 成都 610072;

3. 西南医科大学临床医学院, 四川 泸州 646000

【摘要】 目的 基于负荷动态 CT 心肌灌注成像(CT-MPI), 探究冠状动脉正常及轻微狭窄且无心肌缺血的患者心肌血流量(MBF)定量参数的分布规律。**方法** 纳入 2020 年 10 月至 2024 年 4 月因胸闷、胸部不适或冠心病家族史行冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)及负荷动态 CT 心肌灌注检查的冠状动脉正常及冠状动脉轻微狭窄且无临床心肌缺血证据的 80 例患者。依据心肌 17 段分段法, 软件自动计算心肌各节段的心内膜、外膜及全层的 MBF 值, 计算三根冠状动脉供血区及左心室整体心肌的 MBF 值; 比较在不同心肌节段、内外膜、冠脉供血区之间, 心肌 MBF 值的差异; 分析左心室 MBF 值与年龄、负荷心率、体质指数等连续变量的相关性。**结果** 80 例患者, 左心室整体 MBF 为 $(159.30 \pm 24.92) \text{ ml}/(100 \text{ ml} \cdot \text{min})$, 变异度为 15.64%。16 节段之间的 MBF 值, 在内膜、外膜及全层均是第 3 节段最低, 第 8 节段最高; 在 16 节段中, 大多数(87.5%)节段心内膜的 MBF 值高于心外膜, 在第 5、10~13 和 15、16 节段差异有统计学意义($P < 0.05$); 左前降支供血区 MBF 值最高, 为 $(164.71 \pm 25.73) \text{ ml}/(100 \text{ ml} \cdot \text{min})$; 左心室整体 MBF 值与负荷心率呈低度相关($r = 0.313$, $P < 0.05$)。**结论** 冠状动脉正常及轻微狭窄且无临床心肌缺血证据的患者中, 负荷 CT-MPI 的左心室 MBF 值存在区域分布的差异, 而且受负荷心率的影响, 对临床心肌灌注 MBF 结果解读具有参考价值。

【关键词】 CT 心肌灌注; 心肌血流量; 心率

【中图分类号】 R445.3

【文献标志码】 A

【文章编号】 1672-6170(2026)05-0083-06

Investigation on the distribution of myocardial perfusion blood flow measured by dynamic CT under stress in patients without myocardial ischemia LONG Bing-zhu¹, KONG Wei-fang^{1,2}, XU Zhen-yu¹, LIU Chu-qiao³, LI Fang², HUANG Hong-yun² 1. School of Medicine, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Department of Radiology, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital (Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610072, China; 3. Southwest Medical University, Luzhou 646000, China

【Corresponding author】 KONG Wei-fang

【Abstract】 Objective To explore the distribution patterns of quantitative parameters of myocardial blood flow (MBF) in patients with normal or mildly stenosed coronary arteries without myocardial ischemia based on stress dynamic CT myocardial perfusion imaging (CT-MPI). **Methods** A total of 80 patients with normal coronary arteries or mild coronary artery stenosis and without clinical evidence of myocardial ischemia between October 2020 and April 2024 were enrolled. These patients underwent coronary computed tomography angiography (CCTA) and stress dynamic CT-MPI due to chest tightness, chest discomfort or a family history of coronary heart disease. Firstly, based on the 17 segment segmentation method of the myocardium, the MBF of the endocardium, epicardium and entire layer of each segment of the myocardium as well as the MBF of the three coronary arteries supply areas and the global MBF of the left ventricle were automatically software software-calculated. Secondly, the differences in MBF between different myocardial segments, between the endocardium and epicardium and between coronary blood supply areas were compared. Finally, the correlation between MBF and continuous variables such as age, heart rate after stress and BMI were analyzed. **Results** Among the 80 patients, global left ventricle MBF was $(159.30 \pm 24.92) \text{ ml}/(100 \text{ ml} \cdot \text{min})$. The variability was 15.64%. The MBF values between the segments 16 were the lowest in the segment 3 and the highest in the segment 8 across endocardium, epicardium and entire layer of the myocardium. In the 16 segments, the majority (87.5%) of segments had higher MBF values in the endocardium than the epicardium. Statistically significant differences were observed at segments 5, 10~13, 15, and 16 ($P < 0.05$). The MBF in the left anterior descending artery territory was the highest. It was $(164.71 \pm 25.73) \text{ ml}/(100 \text{ ml} \cdot \text{min})$. Global left ventricular MBF showed a weak correlation with heart rate under stress ($r = 0.313$, $P < 0.05$). **Conclusions** In patients with normal or mildly stenotic coronary arteries and no clinical evidence of myocardial ischemia, left ventricular MBF values from stress CT-MPI show regional distribution differences. They are influenced by stress heart rate. This offers valuable reference for interpreting clinical myocardial blood flow (MBF) results.

【Key words】 CT myocardial perfusion; Myocardial blood flow; Heart rate

药物负荷动态 CT 心肌灌注成像 (computed

tomography myocardial perfusion imaging, CT-MPI) 提取的心肌血流 (myocardial blood flow, MBF) 参数是一种精确的血流灌注定量测量方法, 有助于诊断阻塞性冠状动脉疾病 (coronary artery disease, CAD) 和

【基金项目】 四川省科技厅重点研发项目 (编号: 2022YFS0075)

【通讯作者】 孔维芳

冠状动脉微循环障碍引起的心肌缺血^[1-3]。MBF 值在不同设备、不同扫描参数下的变异很大,参考值范围及影响因素较多,是制约负荷动态 CT-MPI 检查临床推广的重要因素之一。既往研究在小样本的健康志愿者群体中评估了左心室 MBF 值^[4-6],初步探讨了其分布及影响因素。然而,健康志愿者并不能完全反映真实的临床场景。临床中因胸部不适等原因进行冠状动脉 CT 血管造影 (Coronary Computed Tomography Angiography, CCTA) 检查的患者中,冠状动脉正常及轻微狭窄的患者数量众多^[7,8],同样需要了解这一群体的 MBF 值的分布规律,有助于临床解读 MBF 结果,从而为需要进一步功能评估的患者群体提供大数据支持。然而,目前相关研究有限^[9]。本研究旨在探讨冠状动脉正常或冠状动脉轻微狭窄且无心肌缺血患者的左心室 MBF 值的分布规律。

1 资料与方法

1.1 一般资料 纳入 2020 年 10 月至 2024 年 4 月因胸闷、胸部不适或冠心病家族史行 CCTA 及负荷动态 CT-MPI 检查的冠状动脉正常及冠状动脉轻微狭窄且无临床心肌缺血证据的 80 例患者,纳入标准:①临床疑似 CAD 而进行负荷动态 CT-MPI 联合 CCTA 扫描的患者;②经 CCTA 证实冠状动脉正常及轻微狭窄患者(定义为 CAD-RADS 0~1 级,任一心外膜血管直径狭窄<25%)^[10];③心肌各节段 MBF 无局限性灌注缺损或降低,定义为 MBF>100 ml/(100 ml·min)^[10]。排除标准:①既往有心肌梗死、支架置入或冠状动脉搭桥术史;②任何一种影像检查,包括但不限于心脏核磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)、超声心动图、侵入性血管造影(ICA)及心脏核素扫描,提示任何心脏结构及功能异常,如心肌肥厚、心肌微循环障碍、心脏瓣膜疾病等;③心电图及心肌酶学检查提示心肌缺血;④重要的临床资料缺失;⑤负荷动态 CT-MPI 和 CCTA 图像质量不符合诊断和后处理标准。本研究经四川省人民医院伦理委员会批准(审批号:2022-357),回顾性研究豁免书面知情同意书。

1.2 CTMPI 和 CCTA 扫描协议 本研究使用德国西门子第三代双源 CT 设备(Somatom Force)完成图像采集。首先实施心脏平扫以评估冠脉钙化积分,随后对左心室进行 CT-MPI,待受试者休息 5~10 分钟、心率恢复至静息水平后,行 CCTA 检查。CT-MPI 扫描过程中,经静脉以 0.14 mg/(kg·min) 的速率输注三磷酸腺苷二钠(ATP)。注射至第 3 分钟末,以 5 ml/s 流率注入含碘造影剂(碘迈伦,400 mg/ml,博莱科,意大利)40 ml,并随后以相同速率

注射生理盐水 40 ml。扫描延迟时间设为 4 秒,于收缩末期采用摇篮床穿梭模式采集图像,采集结束后立即停用 ATP。扫描参数采用 CARE kV 与 CARE Dose 4D 技术自动调制管电压及管电流以控制辐射剂量,图像重建层厚为 3 mm,重建间隔为 2.9 mm。CCTA 扫描采用前瞻性心电门控触发,以 4~6 ml/s 的流率注射碘造影剂 40~60 ml,继而以相同速率追加 40 ml 生理盐水。设定升主动脉为监测层面,触发阈值为 100 HU,延迟 5 秒启动扫描。扫描条件使用自动管电压与管电流调节技术(Care kV 与 Care Dose 4D),参考管电压为 100 kV,参考管电流为 320 mAs,重建层厚 0.75 mm,层间隔 0.5 mm。

1.3 数据后处理及分析 CCTA 影像采用数坤科技(中国)的分析系统进行处理。依据心血管 CT 学会的标准流程,首先测定冠脉整体钙化积分,随后评估左主干、左前降支、回旋支及右冠主干的狭窄情况,研究对象为冠脉正常或仅存在轻度狭窄的患者。由两名心脏放射科医师对 CT-MPI 与冠脉 CTA 数据进行盲法评估;若意见不一致,则由第三位具有超过 15 年经验的高级医师仲裁。

CT-MPI 图像经 Qr36 算法重建后导入 Syngo.via 平台(西门子,德国),进行以下处理:①手动执行运动校正、噪声抑制与心肌分割,基于混合反卷积模型量化 MBF,自动生成 MBF 的彩色牛眼图与断面图像;②评估图像质量,剔除超过 40% 心肌节段存在伪影的病例;③排除心肌 MBF ≤ 100 ml/(100 ml·min),同时存在局部灌注减低(区域 MBF 与最高 MBF 比值 ≤ 0.6)的患者。最终,灌注数据输入西门子心肌灌注自动分析系统(版本 2.0.5),自动获取左心室 16 个节段内膜、外膜及全层的平均 MBF,并计算整体左心室 MBF 均值(第 17 节段不纳入统计^[11])。

从医学影像存储与通信系统及电子病历中提取患者年龄、性别、身高、体重等基础数据,并据此计算体重指数与体表面积。同时登记合并疾病情况,如高血压、糖尿病、血脂异常及吸烟史等信息。按性别完成分组。高血压、糖尿病与高脂血症的诊断由临床医师依据现行指南判定,吸烟状态(含既往及当前吸烟)则由患者自行报告。记录静息心率及负荷试验中的峰值心率,计算心率增幅(峰值心率与静息心率之差)。进一步分析心肌血流量与负荷心率、心率增幅、体重指数、体表面积及年龄之间的关联。统计 CT 心肌灌注成像的辐射暴露水平,有效剂量(单位:mSv)通过剂量长度乘积与转换系数 $[k=0.014 \text{ msv}/(\text{mgy} \cdot \text{cm})]$ 相乘得出^[12]。

1.4 统计学方法 采用 SPSS 26.0 软件进行统计学分析。正态分布的计量资料以均数 $\pm$ 标准差描述,两

组间比较采用独立样本 t 检验,多组间比较采用单因素方差分析;相关性评估采用 Pearson 检验。偏态分布的计量资料以 $M(P25, P75)$ 表示,组间比较采用非参数检验;计数资料以例数(%)表示,组间比较采用 χ^2 检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者基本特征 进行了 CCTA 联合 CT-MPI 检查的成年患者中,共 98 例患者冠状动脉正常及冠状动脉狭窄 $<25\%$ 。排除 18 例,包括支架植入 2 例,CT-MPI 发现心肌灌注降低 2 例,心电图及超声心动图异常 4 例,CMR 确诊心肌梗厚 2 例,资料缺失 3 例,图像质量不符合评价要求 5 例。最终纳入 80 例,年龄(66 ± 8)岁,男性 34 例(42.5%),体质指数(body mass index, BMI)为(23.79 ± 2.98) kg/m^2 ,体表面积(body surface area, BSA)为(1.67 ± 0.17) m^2 。静息心率(74.89 ± 9.36)次/分,负荷心率(95.95 ± 11.26)次/分。患者中 38 例(47.5%)伴有高血压,12 例(15%)伴糖尿病,15 例(18.75%)伴高脂血症,13 例(16.25%)有吸烟史,36 例冠脉正常,44 例

冠脉轻微狭窄。CT-MPI 辐射剂量(295.16 ± 77.09) $\text{mGy}\cdot\text{cm}/(4.13\pm 1.08)\text{mSv}$ 。

2.2 左心室 MBF 分布 80 例患者左心室整体 MBF 值为(159.30 ± 24.92) $\text{ml}/(100\text{ ml}\cdot\text{min})$,范围为 102.55~232.88 $\text{ml}/(100\text{ ml}\cdot\text{min})$,变异度为 15.64%。比较左心室心肌 1~16 节段的 MBF 平均值,最低 MBF 值位于心底部下间隔壁(3 节段),最高 MBF 值的节段位于中部前间隔壁(8 节段)。左心室内膜、外膜最低 MBF 值与最高 MBF 值的平均值比值分别为 0.809、0.842。比较左心室心肌心内膜与心外膜 MBF 值,大多数(87.5%)节段心内膜 MBF 值高于外膜,在第 5、10、11、13、15 及 16 节段差异有统计学意义(均 $P<0.05$)。见表 1 及图 1、图 2。比较冠脉正常与冠状动脉狭窄 $<25\%$ 患者之间的各心肌节段 MBF 值的差异,发现两者各节段之间差异无统计学意义($P>0.05$)。见表 2。比较左冠状动脉前降支、回旋支及右侧冠状动脉的主干及大分支供血心肌区域的 MBF 平均值,仅心外膜 MBF 值差异有统计学意义($P<0.05$)。见表 3、图 3。

表 1 80 例患者各心肌节段的心肌血流灌注参数比较 [$\text{ml}/(100\text{ ml}\cdot\text{min})$]

部位	全层	心内膜	心外膜	t	P
左心室	159.30±24.92	165.16±27.94	156.41±23.81	0.759	0.057
心底部前壁	164.09±30.50	167.00±34.29	163.03±31.79	-2.850	0.661
心底部前间隔壁	159.34±24.77	152.32±25.77	163.91±25.67	-1.150	0.052
心底部下间隔壁	142.70±22.81	140.12±24.67	144.46±23.05	1.096	0.238
心底部下壁	157.74±25.88	160.60±28.82	155.81±26.41	3.028	0.275
心底部下侧壁	158.47±28.39	167.57±33.05	152.73±28.78	1.103	0.004
心底部前侧壁	163.24±30.82	166.98±32.54	161.37±31.82	1.569	0.271
中部前壁	164.98±29.79	170.08±32.01	162.51±28.92	0.409	0.118
中部前间隔壁	172.15±25.79	173.25±26.75	171.55±25.79	1.808	0.683
中部下间隔壁	164.65±25.75	169.61±28.92	161.82±25.50	2.997	0.073
中部下壁	161.12±27.43	169.58±30.60	155.87±27.17	3.939	0.006
中部下侧壁	156.03±27.55	167.84±32.49	149.29±27.79	2.298	<0.001
中部前侧壁	159.44±27.80	166.20±31.90	155.42±27.29	2.041	0.029
心尖部前壁	162.18±27.36	168.56±29.84	159.36±27.29	2.041	0.045
心尖部前间隔壁	165.48±26.95	167.76±29.33	164.87±26.41	0.653	0.656
心尖部下壁	148.93±26.29	162.67±31.05	141.95±24.74	4.668	<0.001
心尖部侧壁	153.29±26.86	167.77±32.32	147.21±26.34	4.412	<0.001
F	4.721	4.117	4.839		
P	<0.001	<0.001	<0.001		

表 2 80 例患者中冠脉正常与冠状动脉狭窄 $<25\%$ 之间各心肌节段的心肌血流灌注参数比较

部位	CCTA=0($n=36$)	0%<CCTA<25%($n=44$)	t	P
左心室	163.01±25.76	156.28±24.09	0.679	0.170
心底部前壁	166.66±31.63	161.99±29.76	1.536	0.305
心底部前间隔壁	164.01±24.84	155.53±24.33	2.068	0.97
心底部下间隔壁	145.41±23.50	138.02±21.37	1.323	0.121

部位	CCTA = 0 (n = 36)	0% < CCTA < 25% (n = 44)	t	P
心底部下壁	161.95 ± 29.4	154.29 ± 22.38	1.224	0.157
心底部下侧壁	162.75 ± 29.68	154.97 ± 27.13	0.641	0.167
心底部前侧壁	165.69 ± 29.71	161.23 ± 31.89	1.124	0.319
中部前壁	169.11 ± 34.62	161.61 ± 25.07	1.43	0.223
中部前间隔壁	176.68 ± 26.07	168.45 ± 25.25	1.45	0.087
中部下间隔壁	169.24 ± 26.81	160.90 ± 24.52	0.666	0.165
中部下壁	163.38 ± 30.80	159.26 ± 24.55	1.059	0.568
中部下侧壁	159.64 ± 28.49	153.09 ± 6.73	0.941	0.209
中部前侧壁	162.68 ± 27.13	156.79 ± 28.37	1.303	0.180
心尖部前壁	166.57 ± 28.30	158.59 ± 26.34	0.733	0.122
心尖部前间隔壁	167.93 ± 26.96	163.47 ± 27.09	0.806	0.324
心尖部下壁	151.56 ± 27.64	146.78 ± 25.24	1.173	0.400
心尖部侧壁	157.18 ± 24.66	150.12 ± 28.42	0.679	0.150

表 3 80 例患者三根冠脉供血区的 MBF 比较 [ml/(100 ml·min)]

心肌分层	左冠脉前降支 (LAD)	左冠脉回旋支 (LCX)	右冠状动脉 (RCA)	F	P
心内膜 (ENDO)	166.49 ± 27.57	167.27 ± 31.59	160.52 ± 27.04	1.318	0.27
心外膜 (EPI)	164.20 ± 25.14 *	153.20 ± 26.23	151.98 ± 23.24	5.848	0.03
全层 (TOTAL)	164.71 ± 25.73	158.09 ± 27.15	155.03 ± 23.98	2.975	0.53

* 与左冠脉回旋支、右冠状动脉比较, $P < 0.05$

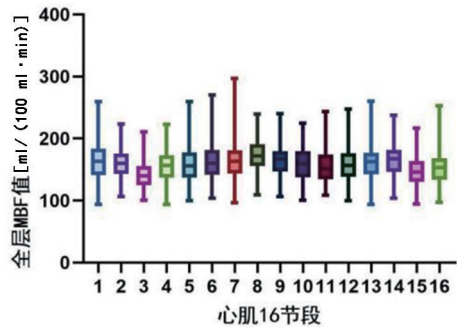


图 1 80 例患者 16 心肌节段全层 MBF 值箱式图

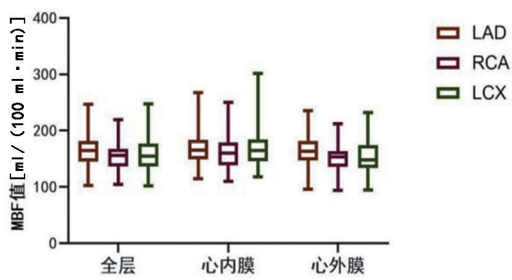


图 3 80 例患者三根冠脉供血区 MBF 值箱式图

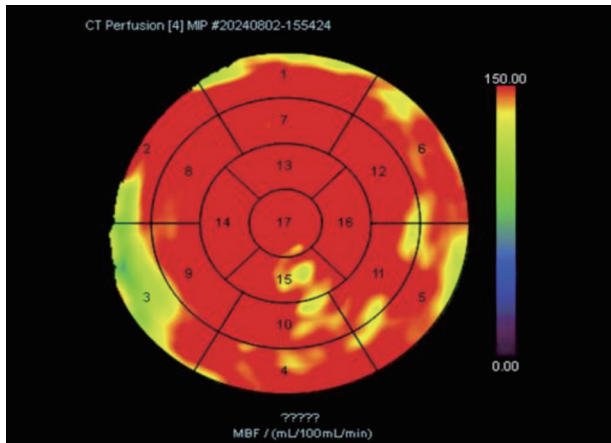


图 2 左心室 MBF 牛眼图 展示左心室 1~17 节段心肌 MBF 值:右侧彩条显示 MBF 值与颜色的关系,红色 MBF 值最高。在第 3 节段(心底部下间隔壁)以黄色和绿色为主,节段内 MBF 平均值最低;在下壁、侧壁多个节段内以红色为主,伴少许黄绿色相间,MBF 值相对较低,在前壁左前降支供血区呈大范围的红色,MBF 值较高。

2.3 MBF 值相关因素分析 不同性别患者左心室整体 MBF 值比较:46 例(57.5%)女性为 $(163.70 \pm 23.12 \text{ ml})/(100 \text{ ml} \cdot \text{min})$, 34 例(57.5%)男性为 $(153.36 \pm 26.35 \text{ ml})/(100 \text{ ml} \cdot \text{min})$, 差异无统计学意义($t = -1.827, P = 0.07$)。

左心室整体 MBF 值与负荷心率呈低度正相关($r = 0.313, P < 0.05$),与静息心率呈弱正相关($r = 0.242, P < 0.05$),与 BSA、BMI 呈弱负相关($r = -0.288, r = -0.275, P < 0.05$),与年龄、心率增量无相关性($P > 0.05$)。见表 4。

表 4 左心室整体 MBF 值与连续变量的相关性分析

变量	r	P
年龄	0.032	0.78
静息心率	0.242	0.031
负荷心率	0.313	0.005
心率增量	0.163	0.148
BSA	-0.288	0.005
BMI	-0.275	0.014

3 讨论

本研究通过对冠状动脉正常及轻微狭窄且无心肌缺血患者的 CT-MPI 检查中 MBF 值分布的探讨,发现左心室整体 MBF 个体之间存在着较大的变异,且在心肌节段之间、心内膜及心外膜之间均存在着差异,而且受负荷心率的影响。

心肌灌注个体间差异较大,变异率为 15.64%,与既往报道^[13]相似。患者个体心肌节段之间的差异主要表现为 MBF 值在心底部下间隔壁(3 节段)的显著降低,这与之前的研究^[4, 14]一致,这些研究表明室间隔壁的 MBF 值是低于前壁和侧壁的 MBF 值的。这可能归因于动态 CT-MPI 图像是在收缩末期采集的,而第 3 节段的血液供应源于穿行于室间隔内的室间隔支,因此室间隔的心肌在图像采集时最大程度地压缩了供血动脉。其他心肌节段之间的 MBF 值无显著差异,其中相对较高为中部前间隔壁(8 节段)。最低与最高节段比值均 >0.8 ,这个比值具有重要的意义,在诊断心肌缺血时推荐使用相对 MBF 值^[15, 16],其中一种计算方法为该患者左心室心肌最低 MBF 值/最高 MBF 值,既往研究^[11]显示,相对 MBF 的诊断心肌缺血的临界值为 $0.6\sim 0.8$ 。了解无心肌缺血患者节段之间的比值,有利于区分生理学及病理性造成的差异。当第 3 节段的 MBF 值较低,但与最高节段 MBF 值的比值仍大于 0.8 时,应考虑为生理性心肌灌注差异所致。因此,在临床实践中或许避免直接比较由不同成像方式和计算算法产生的绝对 MBF 值,而选择使用相对 MBF 值,更能有效地降低个体间由于生理性带来的心肌灌注差异。

左心室在大多数(87.5%)节段心内膜 MBF 值相对心外膜的较高,分析原因为心内膜靠近左心腔,进行心肌分割时,是依靠 CT 阈值设定,不能完全把心腔和心肌分清,容易受心腔内高密度造影剂影响。心内外膜差异最大的心肌节段位于第 10、11、5 节段,即中部下壁、下侧壁及心尖部下壁,这些节段均处于心脏运动幅度较大的节段,虽然经过运动矫正,可能仍会造成心外膜部分信息丢失,从而造成了心外膜 MBF 值的降低。因此尽可能减少运动伪影,比如检查前训练患者进行平稳呼吸或屏气,使用腹带等工具减少呼吸运动及不自主移动,或者运用人工智能等应用对影像算法进行优化,可以使 MBF 值相对接近真实水平。

对冠状动脉正常与冠状动脉狭窄程度 $<25\%$ 的患者各心肌节段 MBF 值进行比较后,结果显示,两组间各节段 MBF 值均未表现出统计学意义上的显著差异。三支冠状动脉的供血区之间的整体 MBF 值未见明显差异,与既往研究^[4, 17]一致。这一结果说明心肌血液供应的均衡性及相互代偿作用。而

在心外膜 MBF 值存在统计学差异,可能因为右冠状动脉供血的第 10、15 节段如上述心脏运动幅度较大的原因,造成 MBF 值的降低,从而造成差异。

本研究显示,MBF 值与负荷心率呈低度正相关,与既往 CT-MPI 研究结论相符,即 MBF 值随心率上升而增加^[18]。该现象可能与个体对负荷药物的反应差异有关。静脉注射负荷药物可抑制心脏副交感神经张力,增强交感神经张力,引发心率加快及外周血管舒张,进而促使 MBF 值上升^[19, 20]。已有 MR-MPI 研究^[21]指出,部分患者即使接受标准剂量腺苷,仍未能实现充分冠脉充血。个体对药物的反应受到多种生理与病理因素调控,例如男性对腺苷的心率反应通常较弱^[19]。因此,心率变化也可作为评估药物反应的一个指标^[21],在解读 CT-MPI 结果时,需关注负荷心率水平;若其上升不显著,所得到的 MBF 值可能未达理想充血状态。临床实践中,采用个体化输注策略,如依据心率反应调整给药流速、时长,或有助于更有效地实现最大充血。

目前关于不同性别之间的左心室 MBF 值是否存在差异还没有定论。本研究结果显示,女性患者的左心室整体 MBF 值虽有高于男性的数值倾向,但差异无统计学意义($P>0.05$),尚不能认为女性患者的左心室整体 MBF 值高于男性。这个结果与其他几项 CT-MPI 研究结果^[4, 9]相似。同时,也有多项研究^[22, 23]报道了不同性别之间存在 MBF 值的差异。再者,造成性别之间 MBF 值差异的潜在原因也尚无定论。还有研究发现在冠状动脉非阻塞性狭窄的肥胖患者也经常出现心肌缺血^[24]。但是也有 CMR 研究^[23]及 CT-MPI 研究^[4, 25]显示,肥胖患者的 MBF 值并没有显著下降。在我们的研究中,BMI、BAS 与整体 MBF 值为弱相关,其具体关联,尚需要进一步研究。另外,关于其他危险因素对左心室整体 MBF 的研究也有所报道。Brown 等^[26]报道,负荷 CMR 中,老年组的 MBF 较低,且 MBF 随着年龄的增长而下降。然而,以上因素在本研究中未发现显著差异及相关性,可能因为这些性别、年龄等人口学特征对 MBF 的影响相对较弱,更容易被如心率、药物反应差异等生理因素掩盖。

本研究有一定的局限性:首先,这是一项单中心回顾性研究,基于辐射剂量考虑研究没有正常志愿者个体作为参照。再者,虽然研究尽可能地排除了其他影像及实验室检查发现的心脏结构及功能异常患者,但仍不能完全排除部分患者伴有传统冠心病危险因素而导致的微循环障碍带来的影响。因此,后续的研究需要更大样本量且前瞻性的设计,排除干扰及混杂因素所致的偏倚。

综上,本研究通过对冠状动脉正常及轻微狭窄

且无心肌缺血患者的 CT-MPI 检查中 MBF 值分布的探讨,初步展示了左心室整体 MBF 个体之间存在着较大的变异,且在心肌节段之间、心内膜及外膜之间均存在着差异,而且受负荷心率的影响。研究结果可以为临床 CT-MPI 结果的解读及理解提供参考价值,具有重要的临床意义。

【参考文献】

- [1] Sliwicka O, Sechopoulos I, Baggiano A, et al. Dynamic myocardial CT perfusion imaging—state of the art[J]. *European Radiology*, 2023, 33(8): 5509-5525.
- [2] Nous FMA, Geisler T, Kruk MBP, et al. Dynamic myocardial perfusion CT for the detection of hemodynamically significant coronary artery disease[J]. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 2022, 15(1): 75-87.
- [3] Yu Y, Yang W, Dai X, et al. Microvascular myocardial ischemia in patients with diabetes without obstructive coronary stenosis and its association with angina [J]. *Korean Journal of Radiology*, 2023, 24(11): 1081.
- [4] Lyu L, Pan J, Li D, et al. Knowledge of hyperemic myocardial blood flow in healthy subjects helps identify myocardial ischemia in patients with coronary artery disease[J]. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 2022, 9: 817911.
- [5] Møller MB, Linde JJ, Fuchs A, et al. Normal values of myocardial blood flow measured with dynamic myocardial computed tomography perfusion[J]. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*, 2024, 25(7): 986-995.
- [6] 赵娜, 马伟, 耿文磊, 等. 基于动态心肌灌注 ct 成像的无冠状动脉病变人群定量心肌血流灌注参数分析[J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(39): 3195-3201.
- [7] Adeyi F, Toman R. In which patients with chest pain is cardiac CT angiography useful for ruling out obstructive coronary artery disease? [J]. *Evidence-based Practice*, 2017, 20(3): 10.
- [8] Cho MS, Roh J, Park H, et al. Practice pattern, diagnostic yield, and long-term prognostic impact of coronary computed tomographic angiography[J]. *Journal of the American Heart Association*, 2020, 9(18): e016620.
- [9] Vliegenthart R, De Cecco CN, Wichmann JL, et al. Dynamic CT myocardial perfusion imaging identifies early perfusion abnormalities in diabetes and hypertension: Insights from a multicenter registry[J]. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, 2016, 10(4): 301-308.
- [10] Pontone G, Baggiano A, Andreini D, et al. Dynamic stress computed tomography perfusion with a whole-heart coverage scanner in addition to coronary computed tomography angiography and fractional flow reserve computed tomography derived[J]. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 2019, 12(12): 2460-2471.
- [11] Wichmann JL, Meinel FG, Schoepf UJ, et al. Absolute versus relative myocardial blood flow by dynamic CT myocardial perfusion imaging in patients with anatomic coronary artery disease[J]. *American Journal of Roentgenology*, 2015, 205(1): W67-W72.
- [12] Rehani MM, Gupta R, Bartling S, et al. ICRP publication 129: radiological protection in cone beam computed tomography (CBCT) [J]. *Annals of the ICRP*, 2015, 44(1): 7-127.
- [13] Kim EY, Chung WJ, Sung YM, et al. Normal range and regional heterogeneity of myocardial perfusion in healthy human myocardium: assessment on dynamic perfusion CT using 128-slice dual-source CT [J]. *International Journal of Cardiovascular Imaging*, 2014, 30(S1): 33-40.
- [14] Ho KT, Ong HY, Tan G, et al. Dynamic CT myocardial perfusion measurements of resting and hyperaemic blood flow in low-risk subjects with 128-slice dual-source CT[J]. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*, 2015, 16(3): 300-306.
- [15] Yi Y, Xu C, Wu W, et al. Stress dynamic myocardial CT perfusion for symptomatic patients with intermediate- or high-risk of coronary artery disease: optimization and incremental improvement between the absolute and relative myocardial blood flow analysis[J]. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, 2020, 14(5): 437-443.
- [16] Kong W, Long B, Li F, et al. Diagnosing myocardial ischemia of obstructive coronary artery disease using dynamic computed tomography myocardial perfusion imaging: optimization of relative myocardial blood flow ratio[J]. *International Journal of Cardiovascular Imaging*, 2024, 40(12): 2481-2490.
- [17] Bechsgaard DF, Gustafsson I, Linde JJ, et al. Myocardial perfusion assessed with cardiac computed tomography in women without coronary heart disease[J]. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 2019, 39(1): 65-77.
- [18] 于丽华, 顾耕, 代旭, 等. 基于第三代双源 ct 动态心肌灌注成像不同负荷后心率增量者的正常心肌血流量范围[J]. *中华放射学杂志*, 2021, 55(2): 123-129.
- [19] Nguyen KL, Bandettini WP, Shanbhag S, et al. Safety and tolerability of regadenoson CMR[J]. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*, 2014, 15(7): 753-760.
- [20] Gebhard C, Messerli M, Lohmann C, et al. Sex and age differences in the association of heart rate responses to adenosine and myocardial ischemia in patients undergoing myocardial perfusion imaging[J]. *Journal of Nuclear Cardiology*, 2020, 27(1): 159-170.
- [21] Karamitsos TD, Ntusi NA, Francis JM, et al. Feasibility and safety of high-dose adenosine perfusion cardiovascular magnetic resonance[J]. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 2010, 12(1): 66.
- [22] Chareonthaitawee P. Heterogeneity of resting and hyperemic myocardial blood flow in healthy humans [J]. *Cardiovascular Research*, 2001, 50(1): 151-161.
- [23] Wang L, Jerosch-Herold M, Jacobs DR, et al. Coronary risk factors and myocardial perfusion in asymptomatic adults[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2006, 47(3): 565-572.
- [24] Quercioli A, Pataky Z, Montecucco F, et al. Coronary vasomotor control in obesity and morbid obesity[J]. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 2012, 5(8): 805-815.
- [25] Tomizawa N, Fujino Y, Kamitani M, et al. Longer diabetes duration reduces myocardial blood flow in remote myocardium assessed by dynamic myocardial CT perfusion[J]. *Journal of Diabetes and its Complications*, 2018, 32(6): 609-615.
- [26] Brown LAE, Gulsin GS, Onciu SC, et al. Sex- and age-specific normal values for automated quantitative pixel-wise myocardial perfusion cardiovascular magnetic resonance [J]. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*, 2023, 24(4): 426-434.

(收稿日期:2025-12-09;修回日期:2026-03-10)

(本文编辑:林 赞)