

“一站式”CT 心肌灌注成像在评估冠状动脉重度狭窄患者中的应用价值^{*}

刘科伶, 彭婉琳, 徐旭, 罗婷, 张金戈, 胡斯娴, 刁凯悦, 李磊, 夏春潮, 李真林[△]

四川大学华西医院 放射科(成都 610041)

【摘要】 目的 对比“一站式”CT 心肌灌注成像(CT-MPI)与心脏磁共振(CMR)MPI 的一致性,探讨其在评估冠状动脉重度狭窄患者中的应用价值。**方法** 前瞻性选取 50 例我院内科经冠状动脉造影证实冠脉一支或多支狭窄程度 $\geq 90\%$ 、欲行冠脉支架植入术的患者,于术前一周内行“一站式”CT-MPI 检查,其中 22 例同时行 CMR 检查。采用后处理软件 Ziostation2 获取灌注缺损心肌、正常心肌的灌注参数并比较,包括血流量(BF)、血容量(BV)、达峰时间(TTP)及平均通过时间(MTT)。采用 Pearson 相关分析比较 CT 和 CMR 缺损/正常心肌相对灌注参数(rBF、rBV、rTTP、rMTT)相关性。采用 Bland-Altman 法分析 CT 及 CMR 左心功能参数一致性。**结果** 与正常心肌相比,灌注缺损心肌 BV、BF 下降,而 MTT、TTP 延长(P 均 <0.05)。CT 和 CMR 测得 rBV、rBF、rMTT 及 rTTP 呈中到高度正相关(r 分别为 0.685、0.641、0.871、0.733, P 均 <0.05)。Bland-Altman 分析发现,22 个点中,有 21 个点均位于一致限范围内,两种检查方式左心功能参数一致性较好。“一站式”CT-MPI 扫描有效剂量为 3.5($P_{25} \sim P_{75}$, 3.3~3.8) mSv。**结论** “一站式”CT-MPI 能一次扫描同时获得冠脉解剖、心肌灌注和左心功能信息,测得的心脏参数与 CMR 一致,可用作冠状动脉重度狭窄患者病情评估的选择方案。

【关键词】 心肌灌注成像 体层摄影术 X 线计算机 冠状动脉疾病

The Application Value of One-stop CT Myocardial Perfusion Imaging in the Evaluation of Patients with Severe Coronary Artery Stenosis LIU Ke-ling, PENG Wan-lin, XU Xu, LUO Ting, ZHANG Jin-ge, HU Si-xian, DIAO Kai-yue, LI Lei, XIA Chun-chao, LI Zhen-lin[△]. Department of Radiology, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

[△] Corresponding author, E-mail: HX_lizhenlin@126.com

【Abstract】 Abstract Purpose “One-stop” CT myocardial perfusion imaging (CT-MPI) was compared with cardiac magnetic resonance (CMR) to investigate its application value in evaluating patients with severe coronary artery stenosis. **Methods** Fifty patients with coronary artery stenosis $\geq 90\%$ of at least one major coronary arteries confirmed by coronary angiography (CAG) in the department of cardiology in our hospital, who referred for coronary artery stent implantation were prospectively enrolled. All the patients underwent “One-stop” CT-MPI within a week before surgery, among which 22 patients underwent CMR examination simultaneously. The postprocessing software Ziostation2 was used to obtain and compare the perfusion parameters of patients with normal and perfusion defect myocardium, including blood flow (BF), blood volume (BV), peak time (TTP), and mean transit time (MTT). Pearson correlation analysis was used to compare the correlation of relative perfusion parameters (defect/normal myocardium) between CT and CMR. Bland-Altman analysis was used to analyze the consistency between CT and CMR in left ventricular (LV) function parameters measurements. **Results** Compared with normal myocardium, BV and BF of perfusion defect myocardium were significantly decreased, while MTT and TTP were significantly prolonged (all $P < 0.05$). The rBV, rBF, rMTT and rTTP were medium to high positive correlated between CT and CMR ($r = 0.685, 0.641, 0.871, 0.733$, respectively, all $P < 0.05$). Bland-Altman analysis showed that 95% (21/22) points were within the 95% limits of agreement (LoA), suggesting the LV function parameters measurements between two methods were highly consistent. **Conclusion** “One-stop” CT-MPI can simultaneously obtain the information about coronary anatomy, myocardial perfusion and LV function. It is of great value in the evaluation of patients with severe coronary artery stenosis, with shorter scan time and less contraindications compared with CMR.

【Key words】 Myocardial perfusion imaging Tomography X-ray computed Coronary artery disease

冠状动脉形成粥样硬化斑块,引起管腔狭窄甚至闭塞,导致冠状动脉疾病(coronary artery disease, CAD),简称冠心病^[1-2]。其主要病理基础

^{*} 四川大学华西医院学科卓越发展 1·3·5 工程项目
(No. ZYGD18019)资助

[△] 通信作者, E-mail: HX_lizhenlin@126.com

为心肌微循环失衡,冠脉血流量调节障碍。根据国际心血管CT协会(Society of Cardiovascular Computed Tomography, SCCT)指南,冠状动脉狭窄程度70%~99%为重度狭窄,100%为完全闭塞^[3]。冠脉重度狭窄或闭塞常导致心肌血流灌注变化,而这种变化较为隐匿。因此,了解狭窄和斑块信息,并及时检出心肌灌注损伤,对患者的治疗决策及预后评估有重要意义。对于冠脉重度狭窄患者,心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance, CMR)能全面评估其心脏形态及功能变化,但检查时间长,禁忌症多,且对冠脉显示较差。CT冠状动脉造影(coronary CT angiography, CCTA)可清晰显示冠脉解剖,但其仅提供冠脉形态学信息,对冠脉重度狭窄患者诊断效能有限^[4]。而CT心肌灌注成像(CT myocardial perfusion imaging, CT-MPI)可评估心肌血流灌注,了解冠脉重度狭窄患者心肌缺血状况。

目前,随着CT成像技术发展,Z轴最大覆盖范围达160 mm的宽体探测器CT逐渐应用于临床,可实现“一站式”CT-MPI,一次扫描同时获得冠脉解剖、心肌血流灌注及心功能情况^[5-6],为全面评估冠脉重度狭窄患者病情提供了新思路。因此,本研究拟采用“一站式”CT-MPI,对比其与CMR灌注及心功能参数的一致性,探讨其在冠状动脉重度狭窄患者病情评估中的应用价值。

1 对象与方法

1.1 研究对象

前瞻性纳入2017年11月至2018年12月我院心内科例行冠状动脉支架植入术的患者50例,于术前一周内行“一站式”CT-MPI检查。因无CMR临床医嘱($n=13$),无法闭气配合($n=8$),体内有金属异物($n=2$),幽闭恐惧症($n=1$),不愿行CMR检查($n=4$),最终22例患者同时行CMR检查。所有患者均有明显胸痛、胸闷症状,且术前经金标准冠状动脉造影(coronary angiography, CAG)证实冠状动脉一支或多支血管狭窄程度 $\geq 90\%$ 。本研究经我院伦理委员会审查通过[2018年审(393)号],所有试验对象均签署知情同意书。

1.2 “一站式”CT-MPI扫描方案

采用GE256排CT扫描仪(Revolution CT, GE Healthcare, Milwaukee, Wisconsin)进行扫描。采用前瞻性心电门控,患者脚先进仰卧位,不控制心率,于自由呼吸状态下行“一站式”CT-MPI扫描。采用小剂量团注测试法(Test bolus),感兴趣区(region of interest,

ROD)置于升主动脉,获得对比剂达峰时间,据其调整动态心肌灌注扫描中血管成像的扫描时间点。扫描范围自气管分叉下2 cm处至心尖。具体扫描参数:管电压80 kV,管电流200 mA,采集45%~45% RR间期,默认扫描14期,总时长42 s。血管成像扫描时间点为达峰时间+3~4 s,该期管电流采用Smart mA(500~600 mA),采集40%~50%和70%~80% RR间期,同时采用50 mA管电流获取5%~95% RR间期图像。探测器宽度视心脏大小选择120/140/160 mm,球管转速0.28 s/rot,自适应迭代重建(ASIR-V)选择50%。以层厚0.625 mm重建冠脉血管图像;层厚1.25 mm重建心肌灌注图像;层厚2.5 mm,5%间隔重建心功能图像。小剂量团注测试采用高压注射器经肘正中静脉,以流速5 mL/s,注入20 mL对比剂(碘帕醇注射液,370 mgI/mL)与生理盐水1:1混合液;心肌灌注以流速5 mL/s,0.7 mL/kg体质量注入对比剂,并以相同流速追加30 mL生理盐水。

1.3 CMR扫描方案

采用西门子3.0T磁共振扫描仪(Skysa; Siemens Medical Solutions, Erlangen, German)及其配备的32通道体部线圈。患者头先进仰卧位,采用心电门控。采用高压注射器经肘正中静脉以流速3 mL/s,注入0.2 mmol/kg钆对比剂,再以相同流速追加20 mL生理盐水。同时,采用True FISP序列重复时间/回波时间/反转时间(TR/TE/TI:163/0.98/95 ms,成像视野(FOV):380 mm×285 mm,重建矩阵:106×192,翻转角:10°,层厚:8 mm,层间距:6.4 mm,期数:80)获得左室心尖至基底6层短轴心肌首过灌注图像,扫描时间5 min 22 s。短轴电影采用bSSFP序列(TR/TE:39.34/1.22 ms, FOV:340 mm×284.4 mm,重建矩阵:139×208,翻转角:38°,层厚:8 mm),逐层无间距成像,扫描范围由心尖至心底。

1.4 灌注及左心功能参数获取

两种方案均采用后处理软件Ziostation2 (Minato-ku™, Tokyo, Japan, version2.4.0.2)处理图像。选取软件中CT和MR“volume perfusion”模块,由2名中、高年资放射科医师结合CAG检查结果,分别判断患者相应灌注缺损心肌及正常心肌并绘制ROI,生成时间-密度曲线(time-intensity curve, TIC),获取心肌血流量(blood flow, BF)、血容量(blood volume, BV)、达峰时间(time to peak, TTP)及平均通过时间(mean transit time, MTT)等灌注定量参数及其伪彩图。取2名医师测量平均

值用于分析,同时采用灌注缺损心肌/正常心肌计算相对灌注参数 rBF、rBV、rTTP 及 rMTT。

选取软件“cardiac function”模块,自动识别心脏收缩和舒张期,手动逐层勾画收缩、舒张期左室内、外膜,并自动计算左心功能参数。包括:左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、收缩末期容积(end-systolic volume,ESV)、舒张末期容积(end-diastolic volume,EDV)及心搏量(stroke volume,SV)。

1.5 CT 辐射剂量

CT 辐射剂量采用剂量-长度乘积(dose length product, DLP)乘以组织权重因子(胸部取 $W=0.014$ mSv/mGy/cm)转换为有效剂量(effective dose, ED)^[7]表示。

1.6 统计学方法

采用 K-S 检验分析资料正态性,符合正态分布的计量资料用 $\bar{x}\pm s$ 表示,不符合者用中位数及其四分位数间距(interquartile range, IQR)表示。根据正态性检验结果选择两独立样本 t 检验或 Mann-Whitney U 检验比较两组间灌注及心功能参数差异。采用 Pearson 相关分析两种方法相对灌注参数相关性。采用 Bland-Altman 法评估两种方法心功能参数一致性。 $\alpha_{\text{双侧}}=0.05$ 。

2 结果

2.1 患者基本情况

共纳入 50 例患者,男性 37 例,女性 13 例,平均年龄(65.9 ± 9.5)岁,体质指数(body mass index, BMI)(22.5 ± 2.4) kg/m²,心率(69.1 ± 11.3) min⁻¹,高血压 24 例,糖尿病 12 例,高血脂 18 例。左前降支、左回旋支、右冠状动脉重度狭窄分别为 39、14、27 例;单、多支血管病变分别为 26 和 24 例。

2.2 灌注缺损心肌与正常心肌 CT-MPI 灌注参数比较

两种心肌 CT-MPI 灌注参数如表 1 所示。相比正常心肌,灌注缺损心肌 BV、BF 下降,MTT、TTP 延长($P<0.05$),见图 1。

表 1 灌注缺损心肌与正常心肌的 CT-MPI 灌注参数比较($\bar{x}\pm s, n=50$)

Table 1 Comparison of CT-MPI perfusion parameters between perfusion defect myocardium and normal myocardium ($\bar{x}\pm s, n=50$)

	Perfusion defect myocardium	Normal myocardium	<i>t</i>	<i>P</i>
BV/(mL/100 mL)	17.3±8.2	24.4±9.1	3.293	0.001
BF/(mL/(100 mL·s))	252.5±36.4	363.1±41.4	3.979	<0.001
MTT/s	13.4±3.4	11.1±2.9	-3.698	<0.001
TTP/s	20.1±5.6	17.3±5.1	-2.573	0.012

BV; Blood volume; BF; Blood flow; TTP; Time to peak; MTT; Mean transit time

2.3 CT-MPI 与 CMR-MPI 相对灌注参数比较

CT-MPI和CMR-MPI均检测出灌注缺损(图

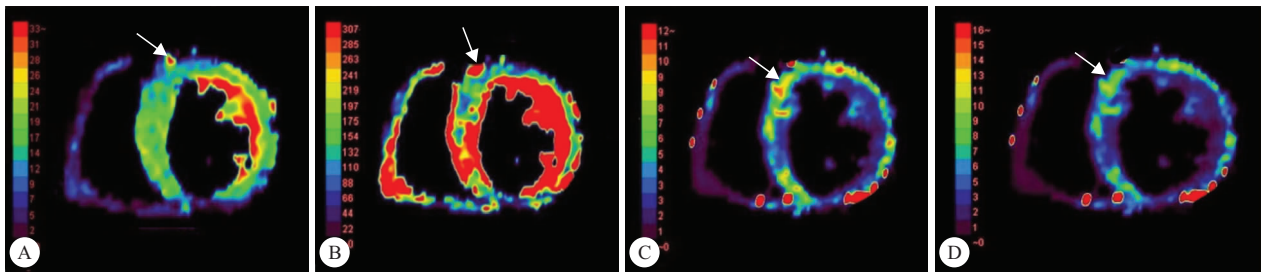


图 1 CAD 患者 CT-MPI 灌注参数伪彩图。灌注缺损区域 BV(A)、BF(B)下降,MTT(C)、TTP(D)延长(白色箭头)

Fig 1 Pseudo-color maps of CT-MPI perfusion parameters ina CAD patient. BV(A),BF(B) decreased, MTT(C), TTP(D) prolonged at the corresponding perfusion defect area (white arrows)

2)。二者测得 rTTP 值差异有统计学意义($P=0.009$),rBV、rBF 和 rMTT 值差异无统计学意义($P>0.05$),见表 2,所得相对灌注参数之间呈中~高度正相关(rBV: $r=0.685$,rBF: $r=0.641$,rMTT: $r=0.871$,rTTP: $r=0.733$)($P<0.001$)(图 3)。

2.4 两种检查方式心功能参数测量一致性

两种检查方式测得 SV 值差异有统计学意义

($P=0.001$),EF、EDV 和 ESV 值差异无统计学意义($P>0.05$),见表 2。二者测得的左心功能参数差值均数分别为:EF(-7.89 ± 9.44)%,EDV(-25.95 ± 23.31) mL/m²,ESV(-6.25 ± 19.71) mL/m² 和 SV(-21 ± 16.99) mL/m²;其 95%置信区间分别为:EF($-28.68,10.61$),EDV($-71.64,19.74$),ESV($-44.89,32.39$)和SV($-54.30,$

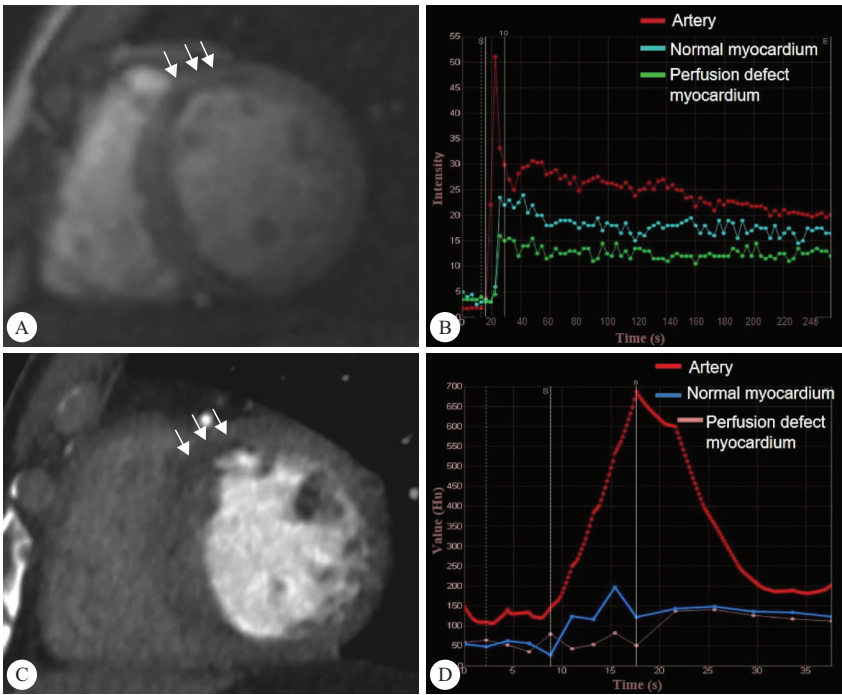


图 2 CMR-MPI (A)、CT-MPI(C)一致显示心肌前壁、前间壁存在灌注缺损(黄箭),TIC 显示灌注缺损心肌 MR 信号强度(B)和 CT 值(D)降低
Fig 2 CMR-MPI(A), CT-MPI(C) imagesconsistently showed perfusion defect (yellow arrows) in the myocardial anterior and anteroseptal walls. TIC showed the MR intensity (B) and CT value (D) of perfusion defect myocardium decreased

表 2 CT-MPI 和 CMR-MPI 相对灌注参数及左心功能参数比较($\bar{x}\pm s,n=22$)

Table 2 Comparison of relative perfusion parameters and left ventricular cardiac function parameters acquired from CT-MPI and CMR-MPI ($\bar{x}\pm s,n=22$)

	CT	CMR	<i>t</i>	<i>P</i>
Relative perfusion parameters				
rBV	0.76±0.15	0.79±0.16	−0.650	0.519
rBF	0.64±0.21	0.60±0.21	0.720	0.475
rMTT	1.24±0.32	1.11±0.23	1.552	0.129
rTTP	1.16±0.14	1.29±0.18	−2.760	0.009
Left ventricular cardiac function parameters				
EF/%	40.66±16.15	48.55±17.72	−1.543	0.130
EDV/(mL/m ²)	141.59±65.21	167.53±61.39	−1.359	0.181
ESV/(mL/m ²)	90.68±61.58	95.61±67.46	−0.253	0.801
SV/(mL/m ²)	50.92±15.9	71.93±13.76	−4.684	<0.001

rBV; Relative blood volume; rBF; Relative blood flow; rTTP; Relativetime to peak; rMTT; Relativemean transit time; EF; Ejection fraction; ESV; End-systolic volume; EDV; End-diastolic volume; SV; Stroke volume

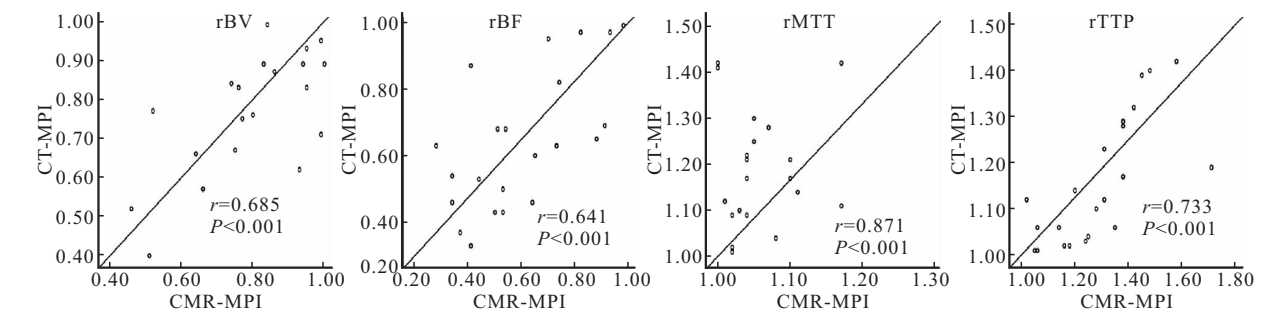


图 3 CT-MPI 和 CMR-MPI 相对灌注参数相关性($n=22$)
Fig 3 Correlation between the relative perfusion parameters of CT-MPI and CMR-MPI ($n=22$)

12.30)(图 4)。22 个点中,有 21 个均位于一致限(limits of agreement, LoA)范围内,可认为这两种检查方式一致性较好。

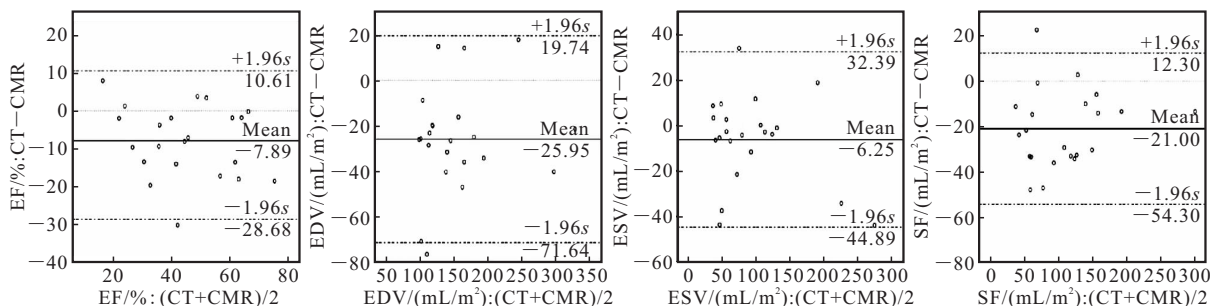


图 4 CT-MPI 和 CMR-MPI 同种左心功能参数测量一致性

Fig 4 Consistency between the left ventricular cardiac function parameters of CT-MPI and CMR-MPI

3 讨论

冠状动脉重度狭窄引起心肌缺血、坏死,为全面评估冠脉重度狭窄患者病情,制定临床决策,患者需进行系列影像学检查。常规 CCTA 仅显示冠脉解剖,不可全面评估患者情况。因此,需结合 CT、CMR、二维超声心动图(two-dimensional transthoracic echocardiography, 2DTTE)和单光子发射计算机断层显像(Single-photon emission computed tomography, SPECT)之中的两种及以上检查来判断是否需要接受经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)。对患者来讲,检查流程复杂且花费大。为减少患者不必要的“下游检查”,避免医疗资源浪费,能“一站式”评估患者冠脉解剖、心肌灌注及心功能情况的检查手段亟待出现。SPECT 是目前评估心肌灌注的“金标准”,但空间分辨率低、辐射剂量较高^[8-9],限制了其临床广泛使用;2DTTE 能无创评估心脏功能,但图像清晰度差,且高度依赖操作者;CMR 对比度好、组织分辨率高,对心肌缺血状况评估准确性较好^[10-11],是目前临床评价心脏解剖、灌注、功能的常用手段,故本研究选择 CMR 作为心肌灌注及心功能参数一致性研究的参考标准。

心肌灌注是血液从冠脉心外膜分支流入,在毛细血管网进行物质交换后经小静脉流出心肌组织的过程,反映心肌微循环功能及心肌活性。和之前研究一致^[12-13],与患者的正常心肌相比,本研究中患者的灌注缺损心肌 BV、BF 显著降低,MTT、TTP 显著延长。这可能是由于冠脉狭窄导致相应供血节段心肌缺血,局部心肌血流量减少,侧支循环建立,

2.5 CT 辐射剂量

“一站式”CT-MPI 扫描 DLP 为 246.6(IQR,237.0~269.4) mGy·cm,ED 为 3.5(IQR,3.3~3.8) mSv。

但侧支血管细小,经侧支循环供血途径时间增加,因此对比剂通过该处心肌时间延长^[14]。研究证实,对于心肌灌注损伤及冠心病的诊断,CT-MPI 和 CMR-MPI 诊断效能相似^[12,15]。但目前尚无研究比较二者所得定量参数。为排除检查方式、成像序列、患者个体差异对参数绝对值的影响,本研究采用相对灌注参数值(灌注缺损心肌/正常心肌)探讨两种检查方式同种灌注参数的一致性。研究发现,二者同种灌注参数间呈中~高度相关性(r : 0.641~0.871)。本研究所采用的后处理软件中,CT 和 MRI 模块灌注参数测量的原理不同,这可能是二者所测得参数未呈强相关的主要原因,此外较小的样本量可能也对结果有一定影响。本研究 CT 和 CMR 所测灌注缺损心肌的灌注参数值与正常心肌均有统计学差异。这些参数不仅可以用于术前评估,对患者支架植入后的再灌注情况评估也有价值^[16]。而对于心功能测定,KARA 等^[17]之前的研究证明,CT 与 CMR 测得的左心功能参数间呈较强正相关($r=0.702, P<0.001$),本研究亦进一步证实二者所得左心功能参数一致性好。但本研究中,CT 与 CMR 测得 rTTP、SV 差异有统计学意义,这可能与 CMR 图像组织分辨率高,心肌内、外膜等显示更清晰,导致在勾画心肌内、外膜及病灶时,二者间存在一定差异相关。此外,样本量较小、后处理软件中 CT、CMR 模块参数计算原理不同等都可能致二者之间存在差异。

CMR 可获得心脏形态和功能信息,但对患者屏气要求高,且检查时间长,而冠脉重度狭窄患者往往病情较重,常难以耐受长时间的 CMR 检查。近年来,宽体探测器 CT 逐渐应用于临床,且 CT 成像速

度快、检查禁忌少,使其成为“一站式”评估冠心病的潜在手段。因此,对于此类患者,以及 CMR 扫描禁忌症者(如幽闭恐惧症),“一站式”CT-MPI 可能是全面评估心脏解剖和功能情况的首选。既往类似的“一站式”扫描(如冠脉+心肌灌注+延迟强化)辐射剂量达到 10.2 mSv^[18]。本研究采用 80 kV、200 mA 的低剂量扫描模式,同时参照国外联合 CCTA 和 CT-MPI 行低剂量扫描的研究^[19],通过小剂量团注测试抓住目标血管对比剂达峰时间,整个“一站式”CT-MPI 平均 ED 仅约 3.3~3.8 mSv。但考虑到辐射剂量,CT-MPI 在一些特殊患者(如肥胖、孕妇、哺乳期妇女等)中仍存在一定限制。

本研究的不足:①仅纳入冠脉重度狭窄患者,缺乏冠脉狭窄程度与心肌灌注及心功能之间相关性的研究;②缺乏术后随访资料;③样本量小。在今后的研究中,将扩大样本量并纳入不同分级的冠脉狭窄患者,同时收集支架植入术后患者远期随访资料,进一步探讨 CT-MPI 与 CMR-MPI 相关性,以及“一站式”CT-MPI 在冠心病患者临床诊断、治疗决策及预后评估方面的价值。

综上,“一站式”CT-MPI 成像能一次扫描同时清晰、快速获取冠脉解剖、心肌灌注和左心功能情况,尤其适于无法行 CMR 检查的重度冠状动脉狭窄患者,为临床诊断和病情评估提供更多有效信息,具有良好的临床应用前景。

参 考 文 献

[1] RENKER M, BAUMANN S, FULLER S R, *et al.* Imaging Coronary Artery Disease and the Myocardial Ischemic Cascade Clinical Principles and Scope. *Radiol Clin North Am*, 2015,53(2):261-269.

[2] FEGER S, RIEF M, ZIMMERMANN E, *et al.* Patient satisfaction with coronary CT angiography, myocardial CT perfusion, myocardial perfusion MRI, SPECT myocardial perfusion imaging and conventional coronary angiography. *Eur Radiol*,2015,25(7):2115-2124.

[3] CURY R C, ABBARA S, ACHENBACH S, *et al.* CAD-RADSTM Coronary Artery Disease-Reporting and Data System. An expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT), the American College of Radiology (ACR) and the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). Endorsed by the American College of Cardiology. *J Cardiovasc Comput Tomogr*,2016,10(4):269-281.

[4] SHARMA R K, ARBAB-ZADEH A, KISHI S, *et al.* Incremental diagnostic accuracy of computed tomography myocardial perfusion imaging over coronary angiography stratified by pre-test probability of coronary artery disease and severity of coronary artery calcification: the CORE320 study. *Int J Cardiol*,2015,201:570-577.

[5] PONTONE G, ANDREINI D, GUARICCI A I, *et al.* Incremental Diagnostic Value of Stress Computed

Tomography Myocardial Perfusion With Whole-Heart Coverage CT Scanner in Intermediate- to High-Risk Symptomatic Patients Suspected of Coronary Artery Disease. *JACC Cardiovasc Imaging*,2019,12(2):338-349.

[6] FEGER S, SHABAN A, LUKAS S, *et al.* Temporal averaging for analysis of four-dimensional whole-heart computed tomography perfusion of the myocardium: proof-of-concept study. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2017, 33 (3): 371-382.

[7] DEAK P D, SMAL Y, KALENDER W A. Multisection CT Protocols: Sex- and Age-specific Conversion Factors Used to Determine Effective Dose from Dose-Length Product. *Radiology*,2010,257(1):158-166.

[8] 王洁, 陈宏伟, 方向明, 等. 负荷动态 CT 心肌灌注成像是心肌缺血的诊断价值. *临床放射学杂志*,2015,34(1):41-45.

[9] PENAGALURI A, HIGGINS A Y, VAVERE A L, *et al.* Computed tomographic perfusion improves diagnostic power of coronary computed tomographic angiography in women: analysis of the CORE320 trial (coronary artery evaluation using 320-Row multidetector computed tomography angiography and myocardial perfusion) according to gender. *Circ Cardiovasc Imaging*,2016,9(11): pii: e005189[2019-03-29]. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.116.005189>.

[10] 董薇, 贺毅, 李全, 等. 心脏磁共振与核医学负荷心肌灌注显像探测冠心病心肌缺血的对比研究. *心肺血管病杂志*, 2016,35(5):373-377.

[11] HAMADA S, GOTSCHY A, WISSMANN L, *et al.* Multi-centre study of whole-heart dynamic 3D cardiac magnetic resonance perfusion imaging for the detection of coronary artery disease defined by fractional flow reserve: gender based analysis of diagnostic performance. *Eur Hear J Cardiovasc Imaging*,2017,18(10):1099-1106.

[12] BAMBERG F, MARCUS R P, BECKER A, *et al.* Dynamic Myocardial CT Perfusion Imaging for Evaluation of Myocardial Ischemia as Determined by MR Imaging. *JACC Cardiovasc Imaging*,2014,7(3):267-277.

[13] HUBER A M, LEBER V, GRAMER B M, *et al.* Myocardium: Dynamic versus Single-Shot CT Perfusion Imaging. *Radiology*,2013,269(2):378-386.

[14] 刘文慈, 崔冰, 王浩, 等. 多层螺旋 CT 心肌灌注对缺血性心脏病的应用价值. *中国医学影像技术*,2013,29(1):38-41.

[15] RIEF M, CHEN M Y, VAVERE A L, *et al.* Coronary Artery Disease: Analysis of Diagnostic Performance of CT Perfusion and MR Perfusion Imaging in Comparison with Quantitative Coronary Angiography and SPECT-Multicenter Prospective Trial. *Radiology*,2018,286(2):461-470.

[16] MEINEL F G, WICHMANN J L, SCHOEPP U J, *et al.* Global quantification of left ventricular myocardial perfusion at dynamic CT imaging: prognostic value. *J Cardiovasc Comput Tomogr*,2017,11(1):16-24.

[17] KARA B, NAYMAN A, GULER I, *et al.* Quantitative Assessment of Left Ventricular Function and Myocardial Mass: A Comparison of Coronary CT Angiography with Cardiac MRI and Echocardiography. *Polish J Radiol*,2016, 81:95-102.

[18] PPERISINAKIS K, SEIMENIS I, TZEDAKIS A, *et al.* Personalized assessment of radiation risks from the one-stop-shop myocardial 256-slice CT examination. *Int J Cardiol*, 2013,168(6):5267-5272.

[19] FUJITA M, KITAGAWA K, ITO T, *et al.* Dose reduction in dynamic CT stress myocardial perfusion imaging: comparison of 80-kV/370-mAs and 100-kV/300-mAs protocols. *Eur Radiol*,2014,24(3):748-755.