

## 心血管磁共振心肌灌注成像联合 CT 血流储备分数 预测阻塞性冠心病发生心血管不良事件的价值\*

周建昌 纪丽萍 蒙志宏 张帆 曹宇佳 李文慧\*\*

河北北方学院附属第二医院, 张家口 075100

**[摘要]** **目的** 探讨心血管磁共振 (CMR) 心肌灌注成像联合 CT 血流储备分数 (CT-FFR) 参数对阻塞性冠心病患者心血管不良事件发生的预测价值。**方法** 选取 2018 年 6 月—2022 年 6 月在河北北方学院附属第二医院治疗的 180 例阻塞性冠心病 (冠状动脉狭窄程度  $\geq 50\%$ ) 患者进行前瞻性研究。所有患者行 CT 血管成像及 CMR 心肌灌注成像检查, 并通过现场随访或电话随访等方式, 收集患者 1 年内的心血管不良事件发生情况。采用单因素及多因素 logistic 回归模型分析发生心血管不良事件的影响因素; ROC 曲线评估不同的预测模型对心血管不良事件发生的预测效能。**结果** 发生心血管不良事件的患者共 45 例为观察组, 其余 135 例为对照组。与对照组比较, 观察组年龄、男性占比、吸烟者占比、总胆固醇水平、合并糖尿病者占比、合并高脂血症者占比、首过灌注时间及心肌延迟强化信号值等指标升高, CT-FFR 及最大上升斜率 ( $Slope_{max}$ ) 指标则降低, 差异均有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。将以上指标进一步做单因素及多因素 logistic 回归分析, 得出年龄、男性、吸烟、合并糖尿病、合并高脂血症及首过灌注时间、心肌延迟强化信号值是阻塞性冠心病患者发生心血管不良事件的独立危险因素 ( $P < 0.05$ ), CT-FFR 及  $Slope_{max}$  是其保护因素 ( $P < 0.05$ )。仅使用临床参数 (包括年龄、性别、吸烟、糖尿病、高脂血症等疾病) 时的 ROC 曲线下面积为 0.721 (95% CI: 0.645 ~ 0.812); CMR 心肌灌注成像联合 CT-FFR 的 ROC 曲线下面积为 0.793 (95% CI: 0.713 ~ 0.873); 在 CMR 心肌灌注成像联合 CT-FFR 的基础上加入临床参数的 ROC 曲线下面积为 0.893 (95% CI: 0.835 ~ 0.952)。**结论** CMR 心肌灌注成像联合 CT-FFR 是阻塞性冠心病患者心血管不良事件发生的独立预测因素, 在临床模型基础上加入 CMR 心肌灌注成像联合 CT-FFR 可显著提高对阻塞性冠心病患者心血管不良事件发生风险的预测效能。

**[关键词]** 心血管磁共振心肌灌注成像; CT 血流储备分数; 阻塞性冠心病; 心血管不良事件; 预测  
doi: 10.3969/j.issn.1674-7593.2024.04.014

### The Value of Cardiovascular Magnetic Resonance Myocardial Perfusion Imaging Combined with CT Fractional Flow Reserve in Predicting Cardiovascular Adverse Events in Obstructive Coronary Heart Disease

Zhou Jianchang, Ji Liping, Meng Zhihong, Zhang Fan, Cao Yujia, Li Wenhui\*\*

The Second Affiliated Hospital of Hebei North University, Zhangjiakou 075100

\*\* Corresponding author; Li Wenhui, email: zyejlwh@163.com

**[Abstract]** **Objective** To analyze the predictive value of cardiovascular magnetic resonance (CMR) myocardial perfusion imaging combined with CT fractional flow reserve (CT-FFR) parameters in predicting cardiovascular adverse events in obstructive coronary heart disease. **Methods** A prospective study was conducted in 180 patients with obstructive coronary heart disease (coronary artery stenosis  $\geq 50\%$ ) who were treated in the Second Affiliated Hospital of Hebei North University from June 2018 to June 2022. All patients underwent CT angiography and CMR myocardial perfusion imaging, and the occurrence of cardiovascular adverse events within 1 year was collected by on-site follow-up or telephone follow-up. Univariate and multivariate logistic regression models were used to analyze the influencing factors of cardiovascular adverse events; ROC curves were used to assess the predictive efficacy of different prediction models for the occurrence of cardiovascular adverse events. **Results** A total of 45 patients developed cardiovascular adverse events (observation group), and the remaining 135 patients were controls. Compared with the control group, the age, male ratio, smoking patient ratio, total cholesterol level, diabetes mellitus ratio, hyperlipidemia ratio, first-pass perfusion time and myocardial delayed enhancement signal value of the observation group increased, while the CT-FFR and maximum slope ( $Slope_{max}$ ) index decreased, and the differences were statistically significant ( $P < 0.05$ ). Further univariate and multivariate logistic analysis of the above indica-

\* 河北省卫生健康委科研基金项目 (20231469)

\*\* 通讯作者: 李文慧, 电子邮箱 zyejlwh@163.com

tors showed that age, male, smoking, diabetes, hyperlipidemia, the first pass perfusion time, and the value of myocardial delayed enhancement signal were independent risk factors for adverse cardiovascular events in patients with obstructive coronary heart disease ( $P < 0.05$ ), and the CT-FFR and Slope<sub>max</sub> were its protection factors ( $P < 0.05$ ). The ROC area under the curve was 0.721 (95% CI: 0.645–0.812) when only using clinical parameters (including age, gender, smoking history, hypertension, diabetes, hyperlipidemia and other diseases). The ROC area under the curve of CMR myocardial perfusion imaging combined with CT-FFR was 0.793 (95% CI: 0.713–0.873). The ROC area under the curve with clinical parameters added on the basis of CMR myocardial perfusion imaging combined with CT-FFR was 0.893 (95% CI: 0.835–0.952). **Conclusion** CMR myocardial perfusion imaging combined with CT-FFR is an independent forecast factor for the development of cardiovascular adverse events in patients with obstructive coronary heart disease. The addition of CMR myocardial perfusion imaging combined with CT-FFR to clinical models significantly improves the predictive efficacy for the risk of cardiovascular adverse events in patients with obstructive coronary heart disease.

[**Key words**] Cardiovascular magnetic resonance myocardial perfusion imaging; CT fractional flow reserve; Obstructive coronary heart disease; Cardiovascular adverse events; Forecast

冠心病是严重威胁人类生命安全的心血管疾病之一,属于临床常见病、多发病,易合并多种心血管不良事件。冠状动脉狭窄导致的血流灌注不足是冠心病发生及发展的重要原因,因此及时有效准确地判断患者的冠脉狭窄及血流灌注程度是冠心病早期筛查的关键<sup>[1]</sup>。心血管磁共振(Cardiovascular magnetic resonance, CMR)心肌灌注成像是评估心肌血流供应情况的重要检查手段<sup>[2]</sup>。CMR可明确是否出现心肌灌注减低以及延迟强化等情况,并对心脏及血管解剖结构、功能、组织特征等进行评估,以准确识别血管循环障碍及冠心病心肌和血管的病变情况<sup>[3]</sup>。CT血流储备分数(CT fractional flow reserve, CT-FFR)是一种将冠状动脉解剖及功能评估结合为一体的无创冠状动脉病变检测方法,具备了冠状动脉CT成像和血流储备分数的优势,与常规的冠状动脉CT血管成像(Computed tomography angiography, CTA)比较更具优势,不仅可准确评估冠状动脉狭窄程度,还可对冠状动脉狭窄引起的血流动力学改变进行准确评估<sup>[4-5]</sup>。本研究旨在探讨CMR心肌灌注成像联合CT-FFR对阻塞性冠心病患者心血管不良事件发生的预测价值,进而为临床提供帮助。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

收集2018年6月—2022年6月在河北北方学院附属第二医院治疗的180例阻塞性冠心病(冠状动脉狭窄程度 $\geq 50\%$ )患者进行前瞻性研究。纳入标准:行CTA及CMR心肌灌注成像检查,影像学检查结果显示为1支或1支以上的冠状动脉中重度狭窄(狭窄程度 $50\% \sim 90\%$ )。排除标准:①急性冠状动脉综合征患者;②合并肺源性心脏病、先天性心脏病或肥厚型心肌病等;③合并严重心脏瓣膜疾病;④既往已行经皮冠状动脉介入治疗或冠状动脉旁路移植的患者;⑤合并恶性肿瘤或自身免疫性疾病等;⑥CTA图像严重钙化等;⑦CT-FFR分析失败的患者。本研究经本院伦理委员会批准,患者均知情同意并签署知情同意书。

### 1.2 方法

**1.2.1 CMR心肌灌注成像** 采用德国西门子公司3.0T磁共振扫描仪进行检查,扫描序列为单次激发快速自旋回波序列,层厚6 mm,重复时间为3个心动周期,回波时间设置为50 ms,扫描心脏的结构有无异常及冠状动脉血管形态有无异常。心脏电影使用亮血序列,对左心室长轴、左心室短轴和左心室流出道的切面进行亮血序列扫描,重复时间设置为2.8~3.0 ms,回波时间设置为1.2 ms,层厚为8 mm。对比剂采用钆双胺,将对比剂以3.5 mL/s的流速注入,并追加双倍的生理盐水,10 min后予以相位敏感反转恢复快速小角度激发序列扫描,重复时间设置为8.7 ms,回波时间设置为3.4 ms,层厚为8 mm。扫描完成后将图像上传至GE 3.0 T ADW 4.6工作站,并使用3D-Slicer软件进行图像分析。根据美国心脏学会左室壁分段标准对心肌进行定位分段,各心肌节段对应相应的供血冠状动脉:第1、2、7、8、13、14、17段心肌供血动脉为左前降支,第3、4、9、10、15段心肌供血动脉为右冠状动脉,第5、6、11、12、16段心肌供血动脉为左回旋支。对患者心肌延迟透壁程度(无强化、非透壁强化、透壁强化)予以评估分析。观察扫描层面确定首过灌注缺损和延迟增强清晰度最佳的层面,通过工作站绘制时间-信号强度曲线,计算病变区和正常心肌区首过灌注最大上升斜率(Maximum slope, Slope<sub>max</sub>),并记录首过灌注时间及心肌延迟强化信号值。

**1.2.2 CTA扫描及CT-FFR分析** 采用德国西门子公司128层螺旋CT进行CTA检查,对比剂采用碘海醇,将对比剂以4 mL/s的流速注入,并追加等剂量的生理盐水。监测设定在升主动脉中央层面,在升主动脉腔内CT值达100 HU时采用Sure-Start软件触发扫描。前门控扫描参数为100 kV管电压,管电流205 mAs,准直器0.6 mm,球管旋转时间0.38 s;后门控扫描参数管电压100 kV,40%~70% RR间期管电流190 mAs,其余间期管电流为19 mAs;将原始数据传至MMWP990图像工作站进行重建。采用德国西门子cFFR3.1.0 FFR分析软

件, 导入 CTA 图像后, 使用深度学习模式计算各支冠状动脉血管的 CT-FFR, 测量位置选在斑块远端 2~3 cm 处。

**1.2.3 数据收集** 收集患者就诊时的一般资料及临床资料, 包括年龄、性别、吸烟史、体质指数、收缩压、舒张压、总胆固醇、甘油三酯、血肌酐、血红蛋白、血红蛋白、血管病变情况等。

**1.2.4 研究终点** 通过现场随访或电话随访等方式, 收集患者行 CMR 心肌灌注成像及 CTA 后 1 年内心血管不良事件的发生情况。其中心血管不良事件包括非致死性的心肌梗死、复发性心绞痛、因不稳定心绞痛住院、严重心律失常或心源性死亡。根据在随访过程中是否发生了心血管不良事件对患者进行分组。

### 1.3 统计学方法

采用 SPSS23.0 统计学软件进行数据分析。

正态分布的计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示, 两组间比较采用独立样本  $t$  检验; 计数资料采用  $\chi^2$  检验; logistic 回归模型分析心血管不良事件发生的影响因素; ROC 曲线评估不同预测模型对心血管不良事件发生的预测效能; 以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 两组临床资料及影像学参数比较

发生心血管不良事件的患者共 45 例为观察组, 其余 135 例为对照组。与对照组比较, 观察组年龄、男性占比、吸烟者占比、总胆固醇水平、合并糖尿病者占比、合并高脂血症者占比、首过灌注时间及心肌延迟强化信号值等指标升高, CT-FFR 及  $Slope_{max}$  指标则降低, 差异均有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。而两组其他指标组间比较差异均无统计学意义 ( $P > 0.05$ ), 见表 1。

表 1 一般资料比较

Tab. 1 General information comparison

变量	对照组 (135 例)	观察组 (45 例)	$t/\chi^2$ 值	$P$ 值
年龄 ( $\bar{x} \pm s$ , 岁)	66.26 $\pm$ 8.59	72.19 $\pm$ 8.67	4.001	<0.001
男性 [例 (%)]	62 (45.90)	35 (77.80)	13.78	<0.001
吸烟史 [例 (%)]	32 (23.70)	25 (55.56)	15.824	<0.001
体质指数 ( $\bar{x} \pm s$ , kg/m <sup>2</sup> )	23.89 $\pm$ 2.98	24.77 $\pm$ 2.65	1.762	0.081
收缩压 ( $\bar{x} \pm s$ , mmHg)	138.87 $\pm$ 24.15	136.75 $\pm$ 27.34	0.493	0.623
舒张压 ( $\bar{x} \pm s$ , mmHg)	86.39 $\pm$ 12.18	86.47 $\pm$ 11.79	0.038	0.969
高血压 [例 (%)]	76 (56.30)	25 (55.56)	0.008	0.931
甘油三酯 ( $\bar{x} \pm s$ , mmol/L)	3.16 $\pm$ 1.15	3.11 $\pm$ 1.09	0.256	0.798
总胆固醇 ( $\bar{x} \pm s$ , mmol/L)	6.09 $\pm$ 2.15	6.55 $\pm$ 2.24	2.665	0.008
血肌酐 ( $\bar{x} \pm s$ , $\mu$ mol/L)	86.18 $\pm$ 13.56	88.35 $\pm$ 12.76	0.943	0.347
血白蛋白 ( $\bar{x} \pm s$ , g/L)	40.06 $\pm$ 2.95	40.12 $\pm$ 5.56	0.093	0.926
血红蛋白 ( $\bar{x} \pm s$ , g/L)	128.16 $\pm$ 19.88	129.33 $\pm$ 19.92	0.342	0.733
糖尿病 [例 (%)]	44 (32.59)	30 (66.67)	16.186	<0.001
高脂血症 [例 (%)]	45 (33.33)	32 (71.11)	12.126	<0.001
多支血管病变 [例 (%)]	70 (51.85)	23 (51.11)	0.007	0.931
CT-FFR	0.71 $\pm$ 0.13	0.63 $\pm$ 0.12	3.642	<0.001
CMR 心肌灌注成像参数				
$Slope_{max}$ ( $\bar{x} \pm s$ )	36.86 $\pm$ 10.12	25.19 $\pm$ 9.23	6.843	<0.001
首过灌注时间 ( $\bar{x} \pm s$ , s)	3.21 $\pm$ 0.88	4.76 $\pm$ 0.85	10.318	<0.001
心肌延迟强化信号值 ( $\bar{x} \pm s$ )	23.33 $\pm$ 10.98	68.65 $\pm$ 11.29	23.811	<0.001

注: 1 mmHg = 0.133 kPa

### 2.2 影响心血管不良事件发生的单因素及多因素 logistic 分析

以年龄、性别、吸烟史、糖尿病、高脂血症、CT-FFR、 $Slope_{max}$ 、首过灌注时间及心肌延迟强化信号值为自变量进行单因素 logistic 分析, 将单因素分析中  $P < 0.05$  的指标进一步做多因

素 logistic 分析, 得出年龄、男性、有吸烟、合并糖尿病、合并高脂血症及首过灌注时间、心肌延迟强化信号值是阻塞性冠心病患者发生心血管不良事件的独立危险因素 ( $P < 0.05$ ), CT-FFR 及  $Slope_{max}$  是其保护因素 ( $P < 0.05$ ), 见表 2。

表 2 单因素及多因素 logistic 回归分析结果

Tab. 2 Univariate and multivariate logistic regression analysis results

变量	单因素分析		多因素分析	
	OR(95% CI)	P 值	OR(95% CI)	P 值
年龄	1.558(1.029 ~ 2.386)	0.002	1.295(1.016 ~ 2.305)	0.005
男性(否=0,是=1)	1.833(1.523 ~ 4.155)	0.005	1.522(1.128 ~ 3.518)	0.006
吸烟史(无=0,有=1)	1.676(1.129 ~ 3.862)	0.001	1.565(1.115 ~ 3.667)	0.001
糖尿病(无=0,有=1)	3.952(1.663 ~ 9.398)	0.002	3.086(1.522 ~ 7.513)	0.011
高脂血症(无=0,有=1)	1.382(1.065 ~ 2.683)	0.007	1.265(1.028 ~ 2.399)	0.012
CT-FFR 值	0.756(0.331 ~ 0.926)	<0.001	0.766(0.526 ~ 0.961)	0.002
Slope <sub>max</sub>	0.887(0.836 ~ 0.943)	<0.001	0.918(0.713 ~ 0.982)	<0.001
首过灌注时间	5.565(2.918 ~ 9.625)	<0.001	4.351(2.366 ~ 7.665)	<0.001
心肌延迟强化信号值	1.366(1.123 ~ 1.655)	0.002	1.182(1.068 ~ 1.558)	0.013

### 2.3 不同模型对心血管不良事件发生的预测效能比较

ROC 曲线结果显示: 仅使用临床参数(包括年龄、性别、吸烟史、糖尿病、高脂血症)时的曲线下面积为 0.721 (95% CI: 0.645 ~ 0.812); CMR 心肌灌注成像联合 CT-FFR 的曲线下面积为 0.793 (95% CI: 0.713 ~ 0.873); 在 CMR 心肌灌注成像联合 CT-FFR 的基础上加入临床参数的曲线下面积为 0.893 (95% CI: 0.835 ~ 0.952), 见图 1。

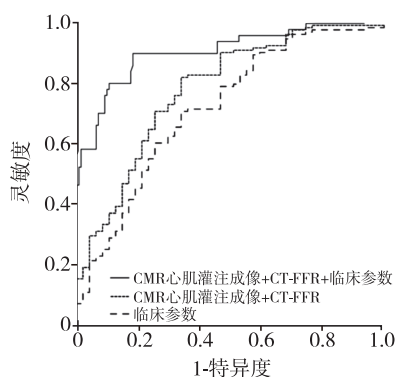


图 1 ROC 曲线图

Fig. 1 ROC curve figure

### 3 讨论

冠状动脉重度狭窄是冠心病患者发生心血管不良事件的独立危险因素, 冠状动脉造影是诊断冠心病的“金标准”, 但其检查的价格和风险相对较高, 是以治疗为目的有创性检查, 对部分已有心肌严重损伤的患者再灌注治疗的效果及预后均不佳<sup>[6-7]</sup>。因此, 及时有效判断冠状动脉狭窄程度以及心肌灌注异常对阻塞性冠心病患者临床治疗及预后都十分重要。

CMR 心肌灌注成像是一种无创评估心肌血供的技术。有研究表明, 一定范围内的比较剂浓度与磁共振扫描信号呈现显著的正相关关系<sup>[8]</sup>。因此可以通过对心脏区域内的时间-信号强度曲线进行量化, 其中心肌首过灌注时间、Slope<sub>max</sub>及心肌延迟强化信号值是最为重要的量化指标, 可根据这些指标对心肌灌注情

况进行有效评估, 以早期发现心肌缺血情况<sup>[9]</sup>。有研究表明, CMR 负荷心肌灌注成像对于血流储备的灵敏度为 84% ~ 90%, 特异度为 89% ~ 92%, 可有效预测主要不良心血管事件的发生<sup>[10]</sup>。近年来 CT-FFR 正逐渐在临床上用于指导冠心病患者进行血运重建及评估预后, 有研究表明 CT-FFR 与动脉粥样硬化斑块及主要心血管不良事件独立相关<sup>[5,11]</sup>。有研究发现 CT-FFR 可有效预测冠心病患者 3 个月内的主要心血管事件发生风险<sup>[12]</sup>。也有研究将 CT-FFR 按照 0.8 进行分类, 与 CT-FFR ≥ 0.8 的患者相比, CT-FFR < 0.8 的患者发生主要心血管不良事件的风险明显升高<sup>[13]</sup>。这些研究也在一定程度上表明 CT-FFR 对心血管不良事件具有一定的预测价值。

在本研究中, 对两组患者的临床资料及影像学参数指标进行比较, 结果表明发生心血管不良事件的患者的年龄、男性患者比例、吸烟患者比例、总胆固醇水平、合并糖尿病的比例、合并高脂血症的比例、首过灌注时间及心肌延迟强化信号值等指标均较无心血管不良事件的患者高, 而 CT-FFR 及 Slope<sub>max</sub>等指标则低于对照组; 进一步对临床参数、CMR 心肌灌注成像指标及 CT-FFR 进行单因素及多因素 logistic 分析, 结果表明年龄、男性、吸烟、合并糖尿病、合并高脂血症、首过灌注时间、心肌延迟强化信号值均是阻塞性冠心病患者 1 年内心血管不良事件发生的独立危险因素, CT-FFR 及 Slope<sub>max</sub>则是其保护因素。既往也有研究表明, 在冠心病患者中, 如患者合并有糖尿病, 血糖调节功能紊乱可能会通过加重糖及脂肪代谢障碍等方式加重冠状动脉血管病变的程度, 与无糖尿病的患者相比发生心血管不良事件的风险大大提高<sup>[14]</sup>。此外, 本研究还对临床参数、CMR 心肌灌注成像指标、CT-FFR 及三者联合进行预测效能的评估, 表明在临床参数的基础上增加 CMR 心肌灌注成像联合 CT-FFR, 可进一步显著提高对阻塞性冠心病患者心血管不良事件发生风险的预测能力, 进而识别出高危患者, 有助于早期指导临床医师制定合理的治疗策略及血运重建方案, 进而改善患者的风险分层及临床预后。

综上所述, CMR 心肌灌注成像联合 CT-FFR 是阻塞性冠心病患者心血管不良事件发生风险的独立预测因素, 在临床模型的基础上加入两者联合可显著提高对阻塞性冠心病患者心血管不良事件发生风险的预测效能, 从而可为临床治疗提供一种有效的风险预测工具。

### 参考文献

- [1] 王泽文, 张龙江. 冠状动脉 CT 血管成像在引导冠心病介入治疗中的应用及进展 [J]. 国际医学放射学杂志, 2023, 46 (1): 44-48.  
Wang Z W, Zhang L J. Application and progress of coronary CT angiography in interventional therapy of coronary heart disease [J]. *Int J Med Radiol*, 2023, 46 (1): 44-48
- [2] 孙毅, 黄海华, 龙江涛. 心脏磁共振心肌灌注成像在冠心病患者冠状动脉病变及微循环梗阻中的临床应用价值 [J]. 分子影像学杂志, 2023, 46 (4): 746-750.  
Sun Y, Huang H H, Long J T. Clinical value of cardiac magnetic resonance myocardial perfusion imaging in coronary artery lesion and microcirculation obstruction in coronary heart disease patients [J]. *J Molecul Imag*, 2023, 46 (4): 746-750.
- [3] 胡瑞, 刘峰, 安小霞, 等. 心脏磁共振心肌灌注成像定量评估微循环障碍的研究进展 [J]. 中国医学影像学杂志, 2023, 31 (8): 892-896.  
Hu R, Liu F, An X X, et al. Research progress in quantitative evaluation of microvascular dysfunction by cardiac magnetic resonance perfusion imaging [J]. *Chin J Med Imag*, 2023, 31 (8): 892-896.
- [4] 朱楠, 刘亚, 蒋双燕, 等. 第 2 代追踪冻结技术下冠状动脉钙化积分、CAD-RADS 评分及 CT 血流储备分数的相关性分析 [J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2023, 21 (5): 503-507.  
Zhu N, Liu Y, Jiang S Y, et al. Correlation analysis of calcium score, CAD-RADS score, CT fractional flow reserve (CT-FFR) under CT second-generation snapshot freeze (SSF2) [J]. *Chin Imag J Integr Tradit West Med*, 2023, 21 (5): 503-507.
- [5] 欧阳丽娜, 王晶晶, 张怀蓉, 等. CT 血流储备分数联合斑块特征对主要不良心脏事件的预测价值 [J]. 中国医学影像学杂志, 2023, 31 (6): 592-597, 599.  
Ouyang L N, Wang J J, Zhang H R, et al. Prediction of coronary CTA-derived fractional flow reserve and atherosclerosis plaque characteristics for major adverse cardiac events [J]. *Chin J Med Imag*, 2023, 31 (6): 592-597, 599.
- [6] 王凯, 刘子暖, 窦冠华, 等. 基于聚类分析优化冠状动脉 CT 血管成像对非阻塞性冠心病的风险分层研究 [J]. 中华放射学杂志, 2023, 57 (9): 969-976.  
Wang K, Liu Z N, Dou G H, et al. Optimizing the risk stratification of coronary CT angiography for non-obstructive coronary artery disease based on cluster analysis [J]. *Chin J Radiol*, 2023, 57 (9): 969-976.
- [7] 吴任杰, 吕楚群, 邱原刚. PCI 相关心肌损伤和心肌梗死研究进展 [J]. 心电与循环, 2023, 42 (2): 198-201.
- Wu R J, Lv C Q, Qiu Y G. Research progress on PCI related myocardial injury and myocardial infarction [J]. *J Electrocardiol Circul*, 2023, 42 (2): 198-201.
- [8] 孔慧慧, 安靖, 曹佳鑫, 等. 心脏磁共振负荷心肌灌注定量评价中华小型猪冠状动脉微循环的初步研究 [J]. 临床放射学杂志, 2022, 41 (4): 752-756.  
Kong H H, An J, Cao J X, et al. Preliminary study on quantitative evaluation of coronary microcirculation of Chinese miniature swine using stress perfusion cardiac magnetic resonance [J]. *J Clin Radiol*, 2022, 41 (4): 752-756.
- [9] 马新伟, 许建铭, 王培军, 等. 多模态磁共振心肌灌注成像对冠心病心肌活性的诊断价值 [J]. 实用放射学杂志, 2018, 34 (6): 881-884.  
Ma X W, Xu J M, Wang P J, et al. Diagnostic value of multimodal magnetic resonance myocardial perfusion imaging for the myocardial viability of coronary heart disease [J]. *J Pract Radiol*, 2018, 34 (6): 881-884.
- [10] 张薇, 王冬芳, 赵国胜, 等. 心脏磁共振对比剂灌注及延迟增强对早期心肌缺血的诊断价值 [J]. 中国基层医药, 2023, 30 (8): 1134-1138.  
Zhang W, Wang D F, Zhao G S, et al. Diagnostic value of cardiac magnetic resonance contrast medium perfusion and delayed contrast enhancement for early myocardial ischemia [J]. *Chin J Prim Med Pharm*, 2023, 30 (8): 1134-1138.
- [11] 丁熠璞, 单冬凯, 王玺, 等. 冠状动脉周围 FAI 对 CT-FFR 诊断重度钙化患者冠脉血流动力学异常的增量价值 [J]. 解放军医学杂志, 2021, 46 (7): 666-672.  
Ding Y P, Shan D K, Wang X, et al. Incremental diagnostic value of pericoronary FAI over CT-FFR for diagnosis of abnormal coronary hemodynamics in patients with severe calcification [J]. *Med J Chin PLA*, 2021, 46 (7): 666-672.
- [12] Peper J, Becker LM, van den Berg H, et al. Diagnostic performance of CCTA and CT-FFR for the detection of CAD in TAVR work-up [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2022, 15 (11): 1140-1149.
- [13] 刘军, 吴勇, 黄虹, 等. CT-FFR 及斑块定量分析预测非阻塞性冠心病不良结局的价值 [J]. 中华危重病急救医学, 2023, 35 (6): 615-619.  
Liu J, Wu Y, Huang H, et al. Value of fractional flow reserve derived from coronary computed tomographic angiography and plaque quantitative analysis in predicting adverse outcomes of non-obstructive coronary heart disease [J]. *Chin Crit Care Med*, 2023, 35 (6): 615-619.
- [14] 郭剑平, 匡林华, 彭丹萍, 等. 2 型糖尿病伴冠心病患者血糖波动及血清 Gal-3 对主要不良心血管事件的预测价值 [J]. 中国现代医学杂志, 2022, 32 (23): 90-96.  
Guo J P, Kuang L H, Peng D P, et al. Predictive value of blood glucose fluctuation and serum Gal-3 level on major adverse cardiovascular events in patients with type 2 diabetes mellitus and coronary heart disease [J]. *China J Mod Med*, 2022, 32 (23): 90-96.