·论　　著·

计算机断层扫描衍生血流储备分数对稳定型胸痛临床管理的价值*

杨国立，马康华，罗　悦，吴　凡，杨　宝，毛　敏△

（重庆医科大学附属第一医院心血管内科，重庆 400010）

［摘　要］ **目的**　探讨使用冠状动脉 CT 血流储备分数（CT-FFR）作为侵入性冠状动脉造影（ICA）的替代方案在选择冠状动脉介入治疗患者时的安全性和可行性。**方法**　对 2021 年 4 月至 2022 年 8 月就诊于该院的稳定型胸痛且经冠状动脉 CT 血管造影诊断其冠状动脉狭窄超过 50％的病例进行 ICA 和回顾性 CT-FFR 评估，比较 CT-FFR 与 ICA 在 1 年随访中对决策和临床结果方面的影响。**结果**　使用 CT-FFR＞0.80 作为干预截止值，在识别冠状动脉狭窄方面具有较高的诊断能力（曲线下面积为 0.85），同时可避免高达 40％的诊断性 ICA 程序操作。在接受血运重建的 CT-FFR≤0.80 的患者中，类似于 ICA 引导的干预措施（21.1％），主要不良心血管事件发生率为 18.8％。**结论**　CT-FFR 可作为指导血运重建的替代工具，具有较高的冠状动脉介入手术取消率和较低的不良心血管事件发生率。

［关键词］ 冠状动脉 CT 血流储备分数；　有创性冠状动脉造影；　冠状动脉计算机断层扫描血管造影；　稳定型胸痛；　心血管事件

DOI：10.3969/j.issn.1009-5519.2023.23.003　　**中图法分类号**：R445

文章编号：1009-5519（2023）23-3970-07　　**文献标识码**：A

Value of computed tomography-fractional flow reservein the clinical management of stable chest pain*

YANG Guoli, *MA Kanghua*, *LUO Yue*, *WU Fan*, *YANG Bao*, *MAO Min*△

（*Department of Cardiology*, *the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University*, *Chongqing* 400010, *China*）

［**Abstract**］ **Objective**　To investigate the safety and feasibility of using coronary arterycomputed tomography-fractional flow reserve（CT-FFR）as an alternative to invasive coronary angiography（ICA）for selecting patients for coronaryintervention. **Methods**　ICA and retrospective CT-FFR were performedin patients with stable chest pain and coronary artery stenosis exceeding 50％ diagnosed through coronary arterycomputed tomography angiography in this hospital from April 2021 to August 2022. The impact of CT-FFR and ICA on decision-making and clinical outcomes were compared inone-year follow-up. **Results**　UsingCT-FFR threshold ＞0.80 for intervention demonstrated high diagnostic accuracy in identifying coronary artery stenosis（the area under the curve was 0.85），and at the same time，up to 40％ of diagnostic ICA program operation search could be avoided. In patients with CT-FFR≤0.80 undergoing revascularization，the incidence of major adverse cardiovascular events was 18.8％，similar to ICA-guided intervention（21.1％）. **Conclusion**　The results indicate that CT-FFR can be used as an alternative tool to guide coronary revascularization，with high cancellation rate of coronary intervention and low incident rate..

［**Key words**］ Coronary arterycomputed tomography-fractional flow reserve；　Invasive coronary angiography；　Coronary arterycomputed tomography angiography；　Stable angina；　Cardiovascular event

心血管疾病给全球带来了巨大的健康和经济负担，根据《中国心血管健康与疾病报告 2021 概要》指出，当前中国的心血管疾病患病率处于持续上升阶段，2019 年全国冠状动脉粥样硬化性心脏病（冠心病）

*　**基金项目**：重庆市自然科学基金面上项目（cstc2021jcyj-msxmX0077）。

作者简介：杨国立（1997－），硕士研究生，住院医师，主要从事冠心病相关研究。　△　**通信作者**，E-mail：maominmaomin123456@163.com。

现患人数约 1 139 万，其中城镇、农村中冠心病分别占全部死因的 44.26％和 46.74％，且死亡率仍呈上升趋势[1]。作为冠心病诊治的重要环节，侵入性冠状动脉造影（ICA）和冠状动脉 CT 血管造影（CCTA）可提供冠状动脉狭窄的解剖信息，从而参与冠心病的诊断及治疗决策的制定。其中 ICA 对病变严重程度的评估是根据目视评估进行的，通常通过狭窄直径百分比进行评估。然而，这种方法受到观察者间和观察者内差异的影响，解释上的差异可能导致不必要的干预，故在慢性稳定型冠心病的治疗中可能出现过度治疗，同时对于临界病变也可能存在治疗不足[2-3]。一项多中心研究通过纳入冠状动脉造影发现至少 1 支冠状动脉狭窄大于或等于 50.0％的 5 875 例稳定型冠心病患者，有 18.1％已行血运重建的患者并不符合血运重建适宜性标准，20.9％已行经皮冠状动脉介入（PCI）治疗不适宜和 16.0％药物治疗指征选择不适宜[4]。此外，已有研究报道 PCI＋药物治疗的初始策略与单独药物治疗稳定型心脏病相比，远期生存率并未显著提高，且不适宜的冠状动脉造影及 PCI 治疗可能增加手术并发症、医疗费用和远期不良事件发生率[5]。

冠状动脉 CT 血流储备分数（CT-FFR）是一种将冠状动脉影像学图像重建和模拟流体力学的功能学分析相结合的技术，其以静息状态下的 CCTA 影像为基础，能够对冠状动脉狭窄病变进行无创性血流动力学评价。多项研究表明，CT-FFR 具有 CCTA 检测的无创、简单和安全性，同时在指导血运重建方面能比单独的 CCTA 产生更好的临床结果，且 CT-FFR 已证明了其诊断冠心病的高精准度性及与血流储备分数（FFR）的良好相关性[2,6]。然而，CT-FFR 与常见临床心血管危险因素的相关性，以及在计划进行 ICA 的患者中使用 CT-FFR 的替代诊断策略安全性的研究仍然较少[7]。因此，目前仍需更多用于评估 CT-FFR 对冠心病的临床决策及未来预后的临床研究。

本研究旨在研究 CT-FFR 与常见临床危险因素的相关关系及对比 ICA 指导的冠状动脉病变的诊断性能。此外，与 ICA 指导的血运重建策略相比，CT-FFR 指导的血运重建策略对评估稳定型冠心病预后安全性的情况，并对 1 年随访的临床结果进行回顾性分析。

1　资料与方法

1.1　一般资料　选取 2021 年 4 月 13 日至 2022 年 8 月 7 日就诊于本院的有症状冠状动脉疾病（CAD）患者，CCTA 记录狭窄程度大于或等于 50％，并在 2022 年 4 月 13 日至 2023 年 8 月 7 日进行为期 1 年的回顾性审查。纳入标准：（1）年龄大于 18 岁且签署知情同意书；（2）稳定型胸痛高度怀疑或已确诊稳定型冠心病患者。排除标准：（1）急性冠状动脉综合征，或慢性完全闭塞性病变、严重钙化病变和扭曲病变，或起搏器植入术后、支架植入术后、人工心脏瓣膜植入术后；（2）CCTA 或冠状动脉造影术禁忌证；（3）临床病情不稳定或预期寿命短于 2 年；（4）急性或慢性肾功能不全；（5）血栓性病变；（6）脑出血或蛛网膜下腔出血史、半年内脑卒中病史；（7）妊娠期；（8）无法遵守研究随访要求，或已参与任何其他临床试验。本研究方案遵循赫尔辛基宣言的伦理准则，并得到本院医学伦理委员会的批准，所有患者均提供了书面知情同意书。

1.2　方法

1.2.1　CCTA 扫描机图像分析　所有患者在基线时均接受 CCTA 及冠状动脉钙化扫描，并使用 64 排螺旋 CT 机进行动态容积 CT 扫描，扫描前注射 320 mg/mL 碘克沙醇等渗造影剂，30 mL 0.9％氯化钠溶液。扫描参数：管电压 100～120 kV，自动扫描软件触发，触发域 280 HU，扫描管电流 100～300 mAs，准直器宽度 128 mm×0.625 mm，X 线管速度 0.27 s/转，矩阵 512×512。请 2 位具有 5 年以上心血管 CT 图像诊断经验的放射科医生深入分析 CCTA 图像质量，观察冠状动脉狭窄程度，然后选择图像质量最佳的序列进行后续 CT-FFR 计算。狭窄程度定义为狭窄血管和参考血管直径的比值，CCTA 狭窄超过 50％的血管被转介给 ICA 进一步评估。

1.2.2　CT-FFR 分析　CT-FFR 软件是由科亚医疗科技有限公司开发的用于对心肌缺血程度的无创 FFR 指标进行定量分析的软件（DEEPVESSEL FFR V1.0）。该软件基于 CCTA，利用人工智能技术计算 FFR，进而评估 CAD 的生理功能。CT-FFR 值是回顾性获得的，因此不会干扰本研究中的临床决策。提示冠状动脉狭窄检查方法中 CCTA 测量狭窄程度大于或等于 50％（中度及重度狭窄），CT-FFR≤0.80，ICA 显示冠状动脉狭窄大于或等于 75％（重度狭窄）。

1.2.3　ICA 程序　ICA 由经过认证的介入心脏病专家根据社会指南进行操作[8]。使用碘造影剂，并使用最小推注量（20～120 mL），平均剂量面积乘积（DAP）为（1.17±0.72）Gy·cm^2。根据手术过程中的直径减少情况定量确定狭窄程度，狭窄程度大于或等于 75％作为血运重建的阳性血管造影指征。治疗策略还依赖于狭窄的位置、狭窄的长度和目标血管的直径。对于高危解剖结构、多支血管疾病或涉及左前降支（LAD）动脉的 2 支血管的病例，2 位经验丰富的评审员共同阅读确定了适当的血运重建策略。

1.2.4　观察指标　所有患者在入组后完成临床基线资料收集。患者在整个住院期间由主管医生根据病情给予最佳药物治疗及必要时行介入诊疗，至病情稳

定后出院。记录住院期间的基本临床与生化指标，统计出院 12 个月以来的主要终点事件及次要终点事件。主要终点事件：主要不良心血管事件（MACE），包括随访期间因包括心源性死亡、非致命急性心肌梗死、脑卒中、需住院的不稳定型心绞痛和血运重建。

1.3　统计学处理　利用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验来评估变量的分布。对于连续变量，以 $\bar{x}\pm s$ 或 $M(P_{25},P_{75})$ 表示，对于分类变量，以绝对值和比例表示。组间比较酌情根据正态分布数据采用独立样本 t 检验分析，偏态数据采用 Mann-Whitney U 检验分析。对于分类变量，使用皮尔逊 χ^2 检验。Spearman 相关分析用于评估各常见临床危险因子之间的相关性。受试者操作特征曲线（ROC 曲线）绘制用于确定 CT-FFR 的诊断性能。Cox 比例风险模型用于评估各组之间关于复合终点的关系。所有统计分析均使用 SPSS 软件（版本 26.0；IBM Corp.，Armonk，NY，USA）进行，统计检验均为双尾，$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2　结　　果

2.1　患者人口特征分析　初步确定了总共 44 例受试者。在被排除的患者中，3 例患有左主干疾病，1 例失访。所有剩余患者均成功进行了 CT-FFR 分析。患者的基线及血管狭窄程度特征见表 1、2。最终纳入 40 例患者，其中 29 例冠状动脉狭窄阳性患者，在 120 个动脉分支中发现 56 个病变，其中 24 条 LAD，16 条左回旋动脉（LCX）和 16 条右冠状动脉（RCA）。进行 ICA 引导的血运重建期间，19 例患者的病变血管中放置了 37 个支架。

表 1　患者基线特征（$n=40$）

项目	数值	项目	数值
性别[n（%）]		FPG[$M(P_{25},P_{75})$，mmol/L]	6.0(5.4,7.3)
男	24(60.0)	HbA1c[$M(P_{25},P_{75})$，%]	6.3(5.8,7.4)
女	16(40.0)	BUN[$M(P_{25},P_{75})$，mmol/L]	6.1(5.2,7.0)
年龄（$\bar{x}\pm s$，岁）	65.4±8.8	Cr[$M(P_{25},P_{75})$，μmol/L]	68.0(62.7,86.0)
BMI（$\bar{x}\pm s$，kg/m^2）	25.0±3.3	UA（$\bar{x}\pm s$，μmol/L）	371.1±105.6
吸烟[n（%）]	18(45.0)	TC（$\bar{x}\pm s$，mmol/）L	4.2±1.0
饮酒[n（%）]	12(30.0)	TG[$M(P_{25},P_{75})$，mmol/L]	1.5(1.0,2.0)
高血压[n（%）]	27(67.5)	HDL-C（$\bar{x}\pm s$，mmol/L）	1.1±0.3
糖尿病[n（%）]	23(57.5)	LDL-C（$\bar{x}\pm s$，mmol/L）	2.5±0.8
高脂血症[n（%）]	22(55.0)	EF[$M(P_{25},P_{75})$，%]	64.0(60.3,70.0)
用药情况[n（%）]		钙化分数[$M(P_{25},P_{75})$，AU]	301.8(30.5,800.1)
阿司匹林	25(62.5)	CACs 分组[n（%）]	
氯吡格雷/替格瑞洛	33(82.5)	CACs≥400 分	17(42.5)
他汀类药物	39(97.5)	CACs<400 分	23(57.5)
ACEI/ARB/ARNI	16(40.0)	住院费用[$M(P_{25},P_{75})$，元]	22 341.9(11 270.2,28 535.5)
β 受体阻滞剂	25(62.5)		

注：BMI 为体重指数；ACEI 为血管紧张素转换酶抑制剂；ARB 为血管紧张素受体拮抗剂；ARNI 为血管紧张素Ⅱ受体/中性内肽酶抑制剂；FPG 为空腹血糖；HbA1c 为糖化血红蛋白；BUN 为尿素氮；Cr 为肌酐；UA 为尿酸；TC 为总胆固醇；TG 为甘油三酯；LDL-C 为低密度脂蛋白胆固醇；HDL-C 为高密度脂蛋白胆固醇；EF 为左室射血分数；CACs 为冠状动脉钙化评分。

表 2　CCTA、CT-FFR、ICA 介导的冠状动脉血管狭窄情况[n（%）]

项目	CCTA	ICA	CT-FFR	
			CT-FFR 划定标准	构成
冠状动脉狭窄情况（总体）				
阳性	40(100.0)	29(72.5)	24(60.0)	
阴性	0	11(27.5)	16(40.0)	
LAD			CT-FFR[n（%）]	
正常	1(2.5)	4(10.0)	>0.80	23(57.5)
轻度	4(10.0)	4(10.0)	≤0.80	17(42.5)

续表 2　CCTA、CT-FFR、ICA 介导的冠状动脉血管狭窄情况

项目	CCTA	ICA	CT-FFR	
			CT-FFR 划定标准	构成
中度	17(42.5)	8(20.0)		
重度	18(45.0)	24(60.0)		
左回旋支			CT-FFR	
正常	13(32.5)	10(25.0)	＞0.80	30(75.0)
轻度	7(17.5)	11(27.5)	≤0.80	10(25.0)
中度	9(22.5)	3(7.5)		
重度	11(27.5)	16(40.0)		
RCA			CT-FFR	
正常	12(30.0)	17(42.5)	＞0.80	25(62.5)
轻度	7(17.5)	3(7.5)	≤0.80	15(37.5)
中度	9(22.5)	4(10.0)		
重度	12(30.0)	16(40.0)		
冠状动脉狭窄程度分层				
正常	2(5.0)	11(27.5)	18(45.0)	
单支病变	14(35.0)	13(32.5)	10(25.0)	
多支病变	24(60.0)	16(40.0)	12(30.0)	

2.2　风险分层　根据患者 ICA 和 CT-FFR 数据集分为 4 组：(1)经 ICA 和 CT-FFR 证实均为阳性的患者 23 例(57.5%)，病变血管数 48 支(85.7%)；(2)经 ICA 证实阳性，但经 CT-FFR 证实阴性 6 例(15.0%)，病变血管数 8 支(14.3%)；(3)经 ICA 证实阴性，但经 CT-FFR 证实阳性 1 例(2.5%)；(4)经 ICA 和 CT-FFR 证实均阴性 10 例(25.0%)。CT-FFR 阳性病变依据 ICA 危险分层的不一致率为 20.70%(6 例)，CT-FFR 阴性病变发生率为 9.10%(1 例)，因此，根据 CT-FFR 阳性指征，ICA 发生率可能会降低 40%(40 例患者中有 16 例来自经 ICA 证实阳性，但经 CT-FFR 证实阴性和经二者证实均为阴性组)。ICA 阳性组中的 37 个病变(66.1%)进行了血运重建，其中 4 个(7.1%)病变的 CT-FFR＞0.80 将暂停血运重建。而另外 3 个病灶 ICA 证实阳性，CT-FFR 证实阴性，但因不稳定型胸痛经评估最终仍然接受了血运重建(5.4%)，CT-FFR 值分别为 0.83、0.83 和 0.84，病变血管均经 ICA 证实为 LAD 重度狭窄程度(狭窄大于或等于 75%)。对单个病变冠状动脉的分析显示，在 24 例 ICA 狭窄程度大于或等于 75%(重度)的 LAD 中，17 例(70.8%)患者的 CT-FFR 结果呈阳性。在 16 例狭窄程度大于或等于 75%(重度)的 LCX 中，10 例(62.5%)患者的 CT-FFR 结果呈阳性。而在 16 例狭窄程度大于或等于 75%的 RCA 中，15 例(93.8%)患者的 CT-FFR 结果呈阳性，显著高于 LAD 及 LCX 中 CT-FFR 阳性患者的比例。

2.3　相关分析　为研究 CT-FFR 与常见心血管危险因素之间的关系，在横断面研究中进行了 Spearman 相关性分析。虽然 CT-FFR 与其他心血管危险变量之间的相关系数(r)相对较低，但 ICA 与 CT-FFR 的相关性最强($r=0.68$)。此外，冠状动脉钙化分数和 BUN 也被发现与 CT-FFR 相关($r=0.34$、-0.33)。见图 1。

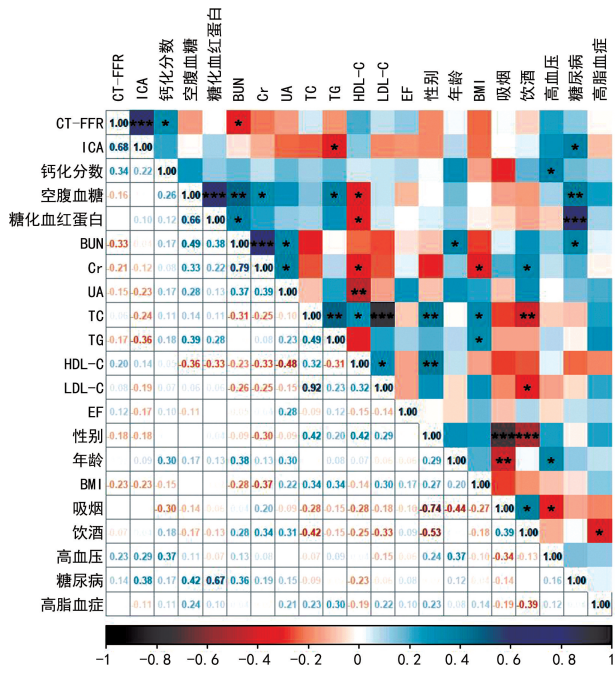

图 1　CT-FFR 与常见心血管危险因素之间的 Spearman 相关性分析

2.4　诊断性能　使用 ICA 作为标准，CT-FFR 的敏感度、特异度、阳性预测值和阴性预测值分别为 79.3%[95%可信区间(95%CI)0.60～0.91]、90.9%

(95%*CI* 0.57～1.00)、95.8%(95%*CI* 0.77～1.00)和 62.5%(95%*CI* 0.36～0.84)。CT-FFR 的 ROC 曲线见图 2。根据 ICA 结果，CT-FFR 表现了出色的诊断性能[曲线下面积(AUC)为 0.85，95% *CI* 0.73～0.97]。

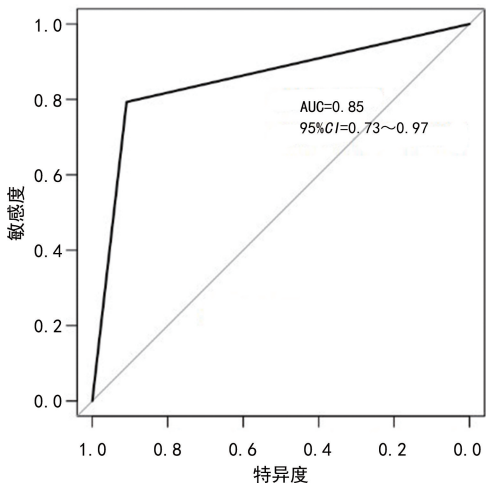

图 2　CT-FFR 预测冠状动脉缺血的 ROC 曲线

2.5　临床结果分析　临床结果分析显示，MACE 发生率为 17.5%(7 例患者)，其中心源性死亡 1 例(2.5%)、非致死性心肌梗死或二次血运重建 2 例(5.0%)、脑卒中 2 例(5.0%)和 2 例(5.0%)全因性死亡。在记录发生 MACE 的 7 例患者中(表 3)，4 例被归类为 CT-FFR≤0.80，5 例归类为 ICA 冠状动脉狭窄程度大于或等于 75%。特别是，CT-FFR≤0.80 且接受血运重建患者的 MACE 发生率为 18.8%(3/16)，而 CT-FFR＞0.80 且未接受血运重建患者的 MACE 发生率为 6.7%(1/15)。而 ICA 提示冠状动脉狭窄程度大于或等于 75%接受血运重建患者的 MACE 发生率为 21.1%(4/19)，而 ICA＜75%且未进行血运重建治疗的 MACE 发生率为 18.2%(2/11)。而在经 ICA 和 CT-FFR 证实均为阳性组中，有 6 例患者在没有进行血运重建的情况下进行治疗，其中 1 例患者在出院后第 8 个月发生非致死性心肌梗死。根据 Cox 回归分析，在 ICA 指导的干预措施[风险比(*RR*)＝1.28，95%*CI* 0.23～7.00，*P*＝0.776]和 CT-FFR 指导的干预措施(*RR* ＝ 1.34，95% *CI* 0.22～8.02，*P*＝0.750)之间观察到类似的 MACE 发生率及危险性。

表 3　12 个月内的累积心血管事件发生情况[*n*(个月)]

MACE	CT-FFR＞0.80 (*n*＝18)	CT-FFR≤0.80 (*n*＝22)	ICA 狭窄程度低于 75% (*n*＝11)	ICA 狭窄程度大于或等于 75%(*n*＝29)
心源性死亡	0	1(9)	0	1(9)
脑卒中	1(10)	1(8)	0	2(8,10)
非致死性心肌梗死	1(10)	1(8)	1(10)	1(8)
全因死亡	1(11)	1(9)	1(11)	1(9)

注：括号内的数据代表发生 MACE 的具体时间，如 1(10)代表第 10 个月发生 1 例脑卒中。

3　讨　论

对本研究纳入的 40 例稳定型胸痛患者进行为期 12 个月的随访，通过 Cox 回归结果显示，在 CCTA 狭窄程度大于或等于 50% 和 CT-FFR≤0.80 的组合指导下 MACE 发生率与 ICA 狭窄程度大于或等于 75%指导下的情况相似。此外，与 ICA 指导的解剖学指征相比，使用 CT-FFR 来确定冠状动脉狭窄病变也具有出色的诊断性能(AUC 为 0.85)，同时导致侵入性诊断程序的高取消率(40%)。因此，本研究结果表明，CT-FFR 可以通过降低 ICA 发生率来提高 CCTA 指导的侵入性检查决策的效率。此外，与单独使用 CCTA 相比，使用 CCTA 狭窄程度大于或等于 50%结合 CT-FFR≤0.80 的患者在发现非缺血性病变方面具有更好的预测能力，且同时观察到相似的 MACE 发生率(与 ICA 相比)，这与先前的研究相似，证明 CT-FFR 能够更好地确定侵入性干预的适宜性，与低 MACE 发生率相关[9-10]。

心血管疾病给全球带来了巨大的健康和经济负担，当前中国心血管疾病患病率及死亡率仍处于持续上升阶段[1]。多年来我国临床上一直在解剖学的指导下进行介入治疗，其中，ICA 和 CCTA 作为主要的提供解剖信息评估冠状动脉狭窄程度的检查方法，因受限于单纯的影像学和形态解剖学信息的缺陷性，并不能确定患者是否在功能学意义上缺血[3]。因此，这种决策策略在慢性稳定型冠心病方面有可能出现过度治疗，而对于临界病变可能存在治疗不足的情况，且过度的冠心病介入治疗也明显加重了冠心病患者的经济负担[4]。随着功能学检查的不断进步，CT-FFR 技术融合了解剖学角度的 CT 血管造影图像与功能学角度的 FFR 技术，利用 CT 血管造影技术的冠状动脉数据作为基础，通过计算流体力学模式，模拟泊肃叶定律，最终获取冠状动脉树任意点的 FFR

值[11]。目前已有多项研究提示以 FFR 作为参考标准，CT-FFR 在识别心肌缺血的病变或狭窄方面的较高诊断性能[12-14]。同时 CT-FFR 介导的 CAD 管理与 ICA 介导的临床事件结果也相似，同时临床成本预计也会降低[9-10,15-16]。既往的 DOUGLAS 等[9]研究表明，CCTA 联合 CT-FFR 可以明显减少 ICA 和 PCI 的数量，同时该治疗方案与常规方案相比，无论是在计划进行无创检查或有创检查的患者中，血运重建率均无显著差异。该研究随访 1 年的结果表明，CCTA 联合 CT-FFR 组较常规组更可降低患者的医疗风险和经济负担，两者有类似的生活质量[15]。FAIRBAIRN 等[10]研究表明，CT-FFR＞0.80 的稳定型心绞痛患者，在随访期的 ICA 及血运重建率较低，且未发生 MACE。上述研究结论与本研究类似，CT-FFR 诊断缺血性病变具有较高诊断性能（AUC＝0.85），而血管水平诊断的敏感度、特异度和阳性预测值分别为 79.3%、90.9%和 95.8%。进一步证明 CT-FFR 在预测冠状动脉狭窄程度的高诊断性能及改善心血管疾病预后的潜在价值。

然而，由于本研究的单中心设置及受样本数量（n＝40）、随访时间等因素的影响，研究结果可能存在一定程度的偏差，因此具有一定局限性，以待有序研究范围更广的研究进一步证实。此外，尽管扫描仪技术和后处理算法有了显著改进，然而真实世界中冠状动脉病变往往比较复杂（严重钙化、串联病变、微循环病变、左主干病变、弥漫病变、血栓病变等），而 CT-FFR 在复杂病变的研究中证据略显单薄，研究中尚有不少亟待解决的难题，仍需进一步研究[17]。

综上所述，CT-FFR 可以作为指导血运重建的替代工具，具有较高的冠状动脉介入手术取消率和较低的 MACE 发生率，为 CAD 患者临床诊疗及预后提供更加高效、科学的预测参考，并最终改善患者预后情况。

参考文献

[1] 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2021 概要[J]. 心脑血管病防治，2022，22(4)：20-36.

[2] CHEN J，WETZEL L H，POPE K L，et al. FFRCT：Current status[J]. AJR Am J Roentgenol，2021，216(3)：640-648.

[3] PARK S J，KANG S J，AHN J M，et al. Visual-functional mismatch between coronary angiography and fractional flow reserve[J]. JACC Cardiovasc Interv，2012，5(10)：1029-1036.

[4] 林深，于春宇，饶辰飞，等. 稳定性冠心病患者冠状动脉血运重建指征适宜程度的多中心研究[J]. 中国循环杂志，2019，34(9)：859-865.

[5] SEDLIS S P，HARTIGAN P M，TEO K K，et al. Effect of PCI on long-term survival in patients with stable ischemic heart disease[J]. N Engl J Med，2015，373(20)：1937-1946.

[6] CURZEN N，NICHOLAS Z，STUART B，et al. Fractional flow reserve derived from computed tomography coronary angiography in the assessment and management of stable chest pain：The FORECAST randomized trial[J]. Eur Heart J，2021，42(37)：3844-3852.

[7] QIAO H Y，TANG C X，SCHOEPF U J，et al. Impact of machine learning-based coronary computed tomography angiography fractional flow reserve on treatment decisions and clinical outcomes in patients with suspected coronary artery disease[J]. Eur Radiol，2020，30(11)：5841-5851.

[8] SCANLON P J，FAXON D P，AUDET A M，et al. ACC/AHA guidelines for coronary angiography：Executive summary and recommendations. A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (Committee on Coronary Angiography) developed in collaboration with the Society for Cardiac Angiography and Interventions[J]. Circulation，1999，99(17)：2345-2357.

[9] DOUGLAS P S，PONTONE G，HLATKY M A，et al. Clinical outcomes of fractional flow reserve by computed tomographic angiography-guided diagnostic strategies vs. usual care in patients with suspected coronary artery disease：The prospective longitudinal trial of FFR (CT)：Outcome and resource impacts study[J]. Eur Heart J，2015，36(47)：3359-3367.

[10] FAIRBAIRN T A，NIEMAN K，AKASAKA T，et al. Real-world clinical utility and impact on clinical decision-making of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve：Lessons from the ADVANCE registry[J]. Eur Heart J，2018，39(41)：3701-3711.

[11] BARBIN C M, VASUDEVAN A, CHOI J W, et al. Frequency of abnormal fractional flow reserve measurements among major coronary arteries[J]. Cardiovasc Revasc Med, 2019, 20(2): 143-146.

[12] KOO B K, ERGLIS A, DOH J H, et al. Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by noninvasive fractional flow reserve computed from coronary computed tomographic angiograms. Results from the prospective multicenter DISCOVER-FLOW (diagnosis of ischemia-causing stenoses obtained via noninvasive fractional flow reserve) study[J]. J Am Coll Cardiol, 2011, 58(19): 1989-1997.

[13] MIN J K, LEIPSIC J, PENCINA M J, et al. Diagnostic accuracy of fractional flow reserve from anatomic CT angiography[J]. JAMA, 2012, 308(12): 1237-1245.

[14] NØRGAARD B L, LEIPSIC J, GAUR S, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: The NXT trial (analysis of coronary blood flow using CT angiography: Next steps)[J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 63(12): 1145-1155.

[15] DOUGLAS P S, DE BRUYNE B, PONTONE G, et al. 1-year outcomes of FFRCT-guided care in patients with suspected coronary disease: The PLATFORM study[J]. J Am Coll Cardiol, 2016, 68(5): 435-445.

[16] CURZEN N P, NOLAN J, ZAMAN A G, et al. Does the routine availability of CT-derived FFR influence management of patients with stable chest pain compared to CT angiography alone?: The FFR (CT) RIPCORD study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2016, 9(10): 1188-1194.

[17] LIU X, MO X, ZHANG H, et al. A 2-year investigation of the impact of the computed tomography-derived fractional flow reserve calculated using a deep learning algorithm on routine decision-making for coronary artery disease management[J]. Eur Radiol, 2021, 31(9): 7039-7046.

(收稿日期：2023-08-30　修回日期：2023-09-20)

(上接第 3969 页)

[8] LIU Q, WANG Y M, GU H F. Lipophagy in atherosclerosis[J]. Clin Chim Acta, 2020, 511: 208-214.

[9] LAVAL T, OUIMET M. A role for lipophagy in atherosclerosis[J]. Nat Rev Cardiol, 2023, 20(7): 431-432.

[10] JIANG H P, SERRERO G. Isolation and characterization of a full-length cDNA coding for an adipose differentiation-related protein[J]. Proc Natl Acad Sci, 1992, 89(17): 7856-7860.

[11] STRAUB B K, GYOENGYOESI B, KOENIG M, et al. Adipophilin/perilipin-2 as a lipid droplet-specific marker for metabolically active cells and diseases associated with metabolic dysregulation[J]. Histopathology, 2013, 62(4): 617-631.

[12] TAN Y M, ZHANG H, GUO D M, et al. Adipophilin involved in lipopolysaccharide-induced inflammation in RAW264.7 cell via extracellular signal-regulated kinase 1/2-peroxisome proliferator-activated receptor gamma pathway[J]. DNA Cell Biol, 2017, 36(12): 1159-1167.

[13] 刘清南，赵晓慧，李帅，等. Plin2 通过 NF-κB 通路参与 oxLDL 诱导巨噬细胞 LOX1 的表达(英文)[J/OL]. 生物化学与生物物理进展，2023，50(11)：2697-2708.

[14] 郑舒展，陈茂，杜延飞，等. 脂自噬通过减少巨噬细胞脂质含量抑制泡沫细胞形成[J]. 中国病理生理杂志，2020，36(11)：1980-1987.

[15] 杨依林，张艳，秦玉，等. 白藜芦醇通过 PLIN2 调控 ATGL/CGI58 和 Rab7/LC3β 促进肝脂质分解[J]. 陆军军医大学学报，2023，45(7)：614-625.

(收稿日期：2023-08-14　修回日期：2023-10-10)