



基于CCTA的血流储备分数临床应用进展

李诗航, 张晓琴

Progress in the Clinical Application of Fractional Flow Reserve Based on Coronary CT Angiography

LI Shihang and ZHANG Xiaoqin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2022.037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

血流储备分数CT成像对冠状动脉旁路移植术后的影像学评价

CT Imaging Evaluation of Fractional Flow Reserve Score after Coronary Artery Bypass Grafting

CT理论与应用研究. 2021, 30(3): 361–369

基于模糊粗糙集的机器学习储层参数预测

Prediction of Reservoir Parameters of Machine Learning Based on Fuzzy Rough Set

CT理论与应用研究. 2018, 27(4): 455–464

CT冠状动脉造影应用于急性胸痛临床实践研究进展

Clinical Practice of CT Coronary Angiography in Acute Chest Pain: A Review

CT理论与应用研究. 2019, 28(6): 747–752

能谱CT对胆汁淤积性肝硬化患儿肝移植术前肝脏血流动力学的评估

Assessing Liver Hemodynamics in Children with Cholestatic Cirrhosis before Liver Transplantation with Dual Energy Spectral CT

CT理论与应用研究. 2018, 27(2): 165–170

基于Polar1DMLP模型的CCTA冠脉管腔分割方法研究

Polar1DMLP: A Coronary Artery Lumen Segmentation Network in CCTA

CT理论与应用研究. 2020, 29(6): 631–642

多期双流团注技术在冠脉CTA中评价右心室功能的应用

Application of Multi-stage Double-flow Mass Injection Technique in Evaluating Right Ventricular Function in Coronary CTA

CT理论与应用研究. 2020, 29(2): 229–240



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李诗航, 张晓琴. 基于 CCTA 的血流储备分数临床应用进展[J]. CT 理论与应用研究, 2023, 32(2): 279-284. DOI:10.15953/j.ctta.2022.037.

LI S H, ZHANG X Q. Progress in the Clinical Application of Fractional Flow Reserve Based on Coronary CT Angiography[J]. CT Theory and Applications, 2023, 32(2): 279-284. DOI:10.15953/j.ctta.2022.037. (in Chinese).

基于 CCTA 的血流储备分数临床应用进展

李诗航¹, 张晓琴^{2✉}

1. 内蒙古医科大学, 呼和浩特 010110
2. 内蒙古自治区人民医院影像科, 呼和浩特 010017

摘要: 近年来基于冠状动脉 CT 血管成像衍生的无创血流储备分数 (FFR_{CT}) 是心血管成像的一项重大进步, 血流储备分数能够识别病变特异性缺血, 并为血运重建的临床决策提供信息, 充当有创性冠状动脉造影 (ICA) 的把关人。本文旨在综述 FFR_{CT} 的研究进展, 并简要探讨存在的局限性。

关键词: 机器学习; 冠状动脉疾病; 血流储备分数; 计算流体力学

DOI:10.15953/j.ctta.2022.037 中图分类号: R814 文献标识码: A

冠状动脉粥样硬化性心脏病 (coronary artery disease, CAD, 简称冠心病) 是全球致死率第 1 的疾病, 因而早期、准确的诊断和评估对于 CAD 患者的有效防治及预后非常重要。研究表明^[1], 冠状动脉狭窄程度与心肌缺血之间存在不相符情况, 因此需要一种有效的检查来评估冠状动脉病变的功能学意义。目前临床上用来判断冠状动脉功能学的方法主要是测量血流储备分数 (fractional flow reserve, FFR), 但因其费用高且检测存在侵入性, 应用范围具有一定限制。

近年来, 采用流体力学及深度学习法处理冠状动脉 CT 血管成像 (coronary artery computed tomography angiography, CCTA) 的图像数据获得的无创血流储备分数 (noninvasive fractional flow reserve derived from CT angiography, FFR_{CT}), 可通过单次检查一站式获取冠状动脉解剖和功能信息, 具有良好的发展潜力^[2]。本文就 FFR_{CT} 以下方面的研究进展进行综述。

1 血流储备分数的概念和基本原理

1.1 FFR 的概念

1993 年, Pijls 等^[3]首次提出了 FFR 的概念, 这是一种经测定冠状动脉内压力推测出其血流情况的方法。FFR 测量值是通过比较最大充血状态下狭窄病变远端的平均压和冠状动脉口部主动脉的平均压, 可表达为:

$$FFR = Pd/Pa, \quad (1)$$

其中, Pd 为最大充血状态下冠状动脉狭窄病变远端的平均压, Pa 为最大充血状态下冠状动脉口部主动脉的平均压。

如果狭窄病变导致血流受限, 病变处的压力会降低^[3-4]。在冠状动脉血流与压力成正相关的情况下, FFR 可理解为该冠状动脉供给心肌区域处于血管病变情况下的最大血流与同区域正常时的最大血流之比。理论上正常比值为 1, 当前指南中建议将 0.80 作为界值^[4], FFR ≤ 0.80 提示狭窄诱发心肌缺血, FFR > 0.80 排除病变引起心肌缺血。

1.2 FFRCT 的基本原理

通过应用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD), 现在可以无创获得 FFR_{CT}。

FFR_{CT} 的推导基于 3 个原则^[5]：① 利用 CCTA 数据建立冠状动脉树和左心室心肌的解剖模型；② 定义边界条件来控制冠状动脉入口和出口在静息和充血状态下的血流量、压力和微血管阻力，其中入口血流量约与所覆盖的左室心肌质量成正比，出口血流量约与出口供血血管直径成正比，阻力约与供血血管直径成反比；③ 将基于 CFD 的数值解应用于解剖模型，模拟静息和充血状态下冠状动脉的血流量、压力以及整个冠状动脉树上每一点的 FFR 值。Taylor 等^[6]详细地描述了心血管流体力学的计算方法及其在 FFR_{CT} 中的应用。

FFR_{CT} 应用较为广泛的计算软件是 HeartFlow-FFR_{CT} 分析 (HeartFlow 公司) 软件，该软件应用三维模型，由于运算量较大，目前都在核心实验室的超级计算机上非现场使用^[7]。目前已经描述了许多降维 CFD 算法，包括西门子医疗 *cfFR* 等。降维技术的优势是可以在现场工作站使用标准台式计算机进行分析和处理，据报道，这些软件分析所需的时间在 30 min 到 2.5 h 之间^[5,8]。但降维技术仍处于开发研究阶段，还没有商业化，关于其诊断效能还需更多数据证实。近年来基于人工智能算法的深度机器学习 (machine learning, ML) 软件操作简便并能够快速获取 FFR_{CT} 值，利于临床推广应用^[9]。

2 FFRCT 的可行性

目前已有 3 项前瞻性、多中心临床研究，以有创 FFR 为参考标准来评估 FFR_{CT} 的诊断效能。这 3 项研究表明，FFR_{CT} 与有创 FFR 有很好的相关性，与 CCTA 相比，FFR_{CT} 的诊断效能更好，其特异度和阳性预测值显著提高，但灵敏度与 CCTA 相当^[7,10-11]。国内基于新型 3D-CFD 的多中心研究显示，其诊断灵敏度和特异度分别为 89% 和 91%^[12]。基于降维 CFD 的研究显示，在血管水平，CCTA 联合 FFR_{CT} 可提高诊断准确性，且与单独 CCTA 相比较，FFR_{CT} 的灵敏度相当，但特异度显著提高^[13]。基于机器学习的研究显示，无论是血管水平还是患者水平，FFR_{CT} 的诊断准确性均优于 CCTA，且诊断结果与基于 CFD 的 FFR_{CT} 有强相关性^[13-14]。

基于这些结果，FFR_{CT} 已被批准用于临床，作为疑似稳定 CAD 患者的其他替代检查方案。

3 FFRCT 的临床应用

3.1 在诊断冠状动脉病变中的应用

尽管大多数评估 FFR_{CT} 诊断效能的研究都是在稳定性胸痛患者中进行的，但近年来报道了 FFR_{CT} 在急性胸痛患者中的使用情况^[15]。该研究将受试的急性胸痛患者全部行 CCTA 检查，筛选出冠状动脉狭窄程度 $\geq 50\%$ 或 $> 25\%$ 伴高危斑块的患者，随机分为 CCTA 组和 FFR_{CT} 组。研究发现，FFR_{CT} 处理算法的时间由 12.6 h 下降至 2.5 h，且随诊 90 天发现两组在主要不良心血管事件 (major adverse cardiovascular event, MACE) 的发生率和医疗费用方面没有差异。同时 FFR_{CT} 阴性患者血运重建率有所下降，并没有发生误诊及死亡，但推迟血运重建的安全性还需要进一步验证。本研究表明急诊 FFR_{CT} 的使用是可行的，但其安全性还需要进行大样本的研究。

急性冠状动脉综合征等严重疾病往往由冠状动脉罪犯斑块破裂所致，因此识别与不良结局相关的罪犯斑块特征^[16] (如正性重构、低密度斑块、血管周围脂肪等)，对减少 MACE 的发生具有重要意义。FFR_{CT} 与其他参数 (如壁剪切应力和轴向斑块应力) 相结合，可在病变、血管和患者水平上进行风险分级和指导治疗。一项研究证实^[17]，与非罪犯斑块相比，罪犯斑块的高危斑块特征较多、FFR_{CT} 值较低、FFR_{CT} 差值较高且壁剪切应力和轴向斑块应力较高。由此得知 FFR_{CT} 检查对于早期甄别及干预潜在罪犯斑块尤为重要，突出了其临床应用价值。

3.2 在指导冠心病患者后续治疗策略中的应用

FFR_{CT} 为患者选择正确的治疗方式。Otake 等^[18]收集了 1 例右冠状动脉 (right coronary, RCA) 弥漫性狭窄伴左前降 (left anterior descending, LAD) 和左旋支 (left circumflex, LCX) 局部

明显狭窄患者。由于 LAD 和 LCX 病变相对局限, 所以选择了支架置入术。但血管造影显示整个 RCA 弥漫性中度狭窄, 没有明显的局灶性病变。FFR_{CT} 显示颜色从蓝色逐渐变为红色, 表明整个血管的压力逐渐下降, 简单支架置入并不能缓解其缺血现象, 因此对 RCA 病变选择了最佳药物治疗。通过应用 FFR_{CT}, 医生可准确识别患者的疾病类型, 为后续治疗做出最佳决策。

FFR_{CT} 科学判断患者是否需要手术治疗。PLATFORM 试验发现^[19], 在计划行有创性冠状动脉造影 (invasive coronary angiography, ICA) 组中, FFR_{CT} 指导组无梗阻性 CAD 患者有 24 例 (12%), 较常规护理组 137 例 (73%) 明显减少, 且 FFR_{CT} 指导组有 61% 患者最终取消了 ICA, 在 90 天内无 MACE 发生。Nørgaard 等^[20]对 189 例患者行 FFR_{CT} 检查, 经过 1 年随访, FFR_{CT} > 0.80 的推迟 ICA 患者中无 1 例发生 MACE。基于上述研究结果可知, FFR_{CT} 可以认为是 ICA 的“守门人”, 避免患者过度治疗的同时节省医疗资源。

FFR_{CT} 计划和模拟冠状动脉介入治疗, 并能预测血运重建的效益。在一项包含 44 名患者的单中心研究中^[21], 研究者利用 FFR_{CT} 虚拟模拟运算模式来预测冠状动脉虚拟支架置入后的血流动力学改变。对实际进行支架置入的病变行 FFR 测量, 结果发现其与虚拟预测的 FFR_{CT} 有很好的一致性, 且 FFR_{CT} 预测支架术后病变特异性缺血的准确率为 96%。这种虚拟技术不仅能够确定靶病变和最佳支架尺寸, 还有助于规划和评估介入治疗策略, 降低患者的医疗风险。

3.3 在冠心病患者预后评估中的应用

NXT 研究发现^[22], 在 206 名平均随访时间 4.7 年的受试者中, FFR_{CT} < 0.80 的患者预后较差, FFR_{CT} 值是不良预后的独立预测因子。ADVANCE 试验证明^[23], FFR_{CT} 值越低 MACE 发生率越高。FFR_{CT} 与不同测量指标结合可提高预测 MACE 的能力^[24], 如 FFR_{CT} < 0.80 及斑块特性、CCTA 冠状动脉狭窄程度 > 60.5% 预测 MACE 曲线下面积高达 0.821。上述研究表明 FFR_{CT} 对患者的短期和长期临床预后有良好的预测作用。

3.4 在其他病变中的应用

FFR_{CT} 还可用于其他疾病的研究, 如心肌桥、重度主动脉瓣狭窄等。研究发现^[25], 无论是浅表型还是纵深型心肌桥患者都会导致其远端 FFR_{CT} 值降低, 心肌桥的长度和收缩期狭窄程度是 FFR_{CT} 异常的主要预测因子, 且 FFR_{CT} 值异常的心肌桥患者典型心绞痛患病率更高, 加深了我们对心肌桥疾病的认识。

FFR_{CT} 还可用到主动脉瓣严重狭窄患者的研究中。大约 25%~50% 的主动脉瓣严重狭窄患者同时伴有 CAD, Michail 等^[26]首次验证了 FFR_{CT} 在主动脉瓣严重狭窄患者中的应用是安全、有效的, 但结果还需在更大规模的多中心试验中进行证实。

4 FFR_{CT} 面临的挑战

4.1 图像质量

FFR_{CT} 依赖于高质量的 CCTA 图像, 在临床研究中, 有相当大比例的患者图像不能进行 FFR_{CT} 评估。在 NXT^[10]和 PLATFORM^[19] 研究中大约 13% 的病例不能进行 FFR_{CT} 分析, 而后来的 ADVANCE 研究中注册队列和临床队列分别仅有约 3% 和 8% 的数据不能使用, 这可能与双源技术的普及应用及 FFR_{CT} 算法的改进有关^[27]。

图像质量不佳的主要原因是运动伪影^[27], 因此应采用心血管 CT 指南的 CCTA 扫描方式采集图像, 以确保 FFR_{CT} 结果的准确、可靠^[28]。在 DeFACTO 试验中, 给心率过快患者使用 β 受体阻滞剂和硝酸甘油可提高 FFR_{CT} 的特异度^[18]。还有一些伪影会降低 FFR_{CT} 的灵敏度和总体准确性^[16], 这些伪影可通过调节患者心率等方法得以改善。在使用 FFR_{CT} 之前需了解这些情况, 以确保数据采集最优化。

4.2 冠状动脉钙化

对于 CFD 分析, 钙化可能使冠状动脉管腔及边界变模糊。钙化积分 (agatston score, AS) 越高, 管腔被遮挡的可能性就越大。在 NXT 亚组研究中显示, 随着 AS 的增高, FFR_{CT} 的诊断准确性并没有显著变化^[16]。

然而现实中 AS 非常高的患者很少见, 这项研究可能没有足够的病例数来检测出不同 AS 之间显著的差异, 因此, 目前还需大量研究证实冠状动脉钙化程度较重患者的 FFR_{CT} 诊断准确性。

4.3 FFR_{CT} 值的解释

在介入心脏病学中, 冠状动脉病变有明确的临界值, FFR \leq 0.80 的病变应进行冠状动脉血运重建, FFR $>$ 0.80 的病变建议药物治疗^[29-30], FFR 值在 0.75~0.80 范围内为“灰色区域”, 如何治疗需基于患者的总体情况^[4]。

最近的 meta 分析显示, FFR_{CT} 值在 $>$ 0.82 和 \leq 0.74 时与 FFR 有很好的一致性, 但在灰色区域的一致性较差^[31], 大多数 FFR_{CT} 对病情的错误分类就发生在此区域。因此在“灰色区域”的患者应结合更多临床信息或其他检查来决定后续治疗策略。

4.4 其他局限性

① 适用人群有限。到目前为止, 在 FFR_{CT} 试验中, 排除标准包括新发心肌梗死、支架置入或冠状动脉旁路手术、有 β 阻滞剂禁忌症、急性冠状动脉综合征、严重心律失常等患者, 其在微血管疾病 (糖尿病、高血压) 患者中的准确性也尚未得到证实^[18], FFR_{CT} 在这些患者中的应用待进一步核实; 此外, FFR_{CT} 涉及造影剂的使用, 不适用于慢性肾脏疾病患者^[32]。② 部分软件计算时间较长, 例如 HeartFlow-FFR_{CT} 分析软件需 1~4h 得到结果, 不适合在急诊科等紧急情况下使用^[14]。

5 小结

综上所述, FFR_{CT} 作为一种对冠状动脉病变进行解剖学和功能学一站式评估的无创检查, 已证实与 FFR 有良好的一致性, 并显示出很高的诊断准确性。FFR_{CT} 不仅是 CCTA 的重要辅助手段, 在指导临床治疗决策等方面的作用也逐渐得到了肯定。

相信随着 CT 技术和计算机设备的不断更新, FFR_{CT} 将会在冠状动脉疾病诊疗方面发挥越来越大的作用, 造福越来越多的患者。

参考文献

- [1] 孙欣杰, 徐怡, 朱晓梅, 等. 基于 CCTA 的冠脉斑块特征参数与血流储备分数的相关性研究[J]. 医学影像学杂志, 2020, 30(12): 2203-2208.
SUN X J, XU Y, ZHU X M, et al. Association analysis of atherosclerotic plaque characteristics with FFRCT values in coronary CT angiography[J]. Journal of Medical Imaging, 2020, 30(12): 2203-2208. (in Chinese).
- [2] 乔红艳, 张龙江. FFR_{CT} 的技术原理、注意事项和结果解释[J]. 国际医学放射学杂志, 2018, 41(3): 258-262.
QIAO H Y, ZHANG L J. Fractional flow reserve derived from computed tomography angiography: Physical principles, considerations and interpretation of results[J]. International Journal of Medical Radiology, 2018, 41(3): 258-262. (in Chinese).
- [3] PIJLS N H, Van SON J A, KIRKEEIDE R L, et al. Experimental basis of determining maximum coronary, myocardial, and collateral blood flow by pressure measurements for assessing functional stenosis severity before and after percutaneous transluminal coronary angioplasty[J]. Circulation, 1993, 87: 1354-1367.
- [4] 中华医学会放射学分会质量控制与安全管理专业委员会, 江苏省医学会放射学分会智能影像与质量安全学组. 冠状动脉 CT 血流储备分数应用中国专家建议[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(10): 925-933.
Quality Control and Safety Management Committee of Radiology Committee of Chinese Medical Association, Intelligence Imaging and Quality Safety Committee of Jiangsu Medical Association.

- Application of CT derived fractional flow reserve: Chinese expert recommendations[J]. *Chinese Journal of Radiology*, 2020, 54(10): 925-933. (in Chinese).
- [5] KHAV N, IHDAYHID A R, KO B. CT-derived fractional flow reserve (CT-FFR) in the evaluation of coronary artery disease[J]. *Heart, Lung and Circulation*, 2020, 29: 1621-1632.
- [6] TAYLOR C A, FONTE T A, MIN J K. Computational fluid dynamics applied to cardiac computed tomography for noninvasive quantification of fractional flow reserve: Scientific basis[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2013, 61: 2233-2241.
- [7] KIM H J, VIGNON-CLEMENTEL I E, COOGAN J S, et al. Patient-specific modeling of blood flow and pressure in human coronary arteries[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2010, 38(10): 3195-3209.
- [8] FUJIMOTO S, KAWASAKI T, KUMAMARU K K, et al. Diagnostic performance of on-site computed CT-fractional flow reserve based on fluid structure interactions: Comparison with invasive fractional flow reserve and instantaneous wave-free ratio[J]. *European Heart Journal-Cardiovascular Imaging*, 2019, 20: 343-352.
- [9] WANG Z Q, ZHOU Y J, ZHAO Y X, et al. Diagnostic accuracy of a deep learning approach to calculate FFR from coronary CT angiography[J]. *Journal of Geriatric Cardiology*, 2019, 16(1): 42-48.
- [10] 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]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2014, 63: 1145-1155.
- [11] 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.
- [12] TANG C X, LIU C Y, LU M J, et al. CT FFR for ischemia-specific CAD with a new computational fluid dynamics algorithm: A chinese multicenter study[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2020, 13: 980-990.
- [13] COENEN A, KIM Y, KRUK M, et al. Diagnostic accuracy of a machine-learning approach to coronary computed tomographic angiography-based fractional flow reserve: Result from the MACHINE consortium[J]. *Circulation Cardiovascular Imaging*, 2018, 11: e007217.
- [14] TESCHE C, de CECCO C N, ALBRECHT M H, et al. Coronary CT angiography-derived fractional flow reserve[J]. *Radiology*, 2017, 285: 17-33.
- [15] CHINNAIYAN K M, SAFIAN R D, GALLAGHER M L, et al. Clinical use of CT-derived fractional flow reserve in the emergency department[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2020, 13: 452-461.
- [16] NAZIR M S, MITTAL T K, WEIR-MCCALL J, et al. Opportunities and challenges of implementing computed tomography fractional flow reserve into clinical practice[J]. *Heart*, 2020, 106: 1387-1393.
- [17] LEE J M, CHOI G, KOO B K, et al. Identification of high-risk plaques destined to cause acute coronary syndrome using coronary computed tomographic angiography and computational fluid dynamics[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2019, 12: 1032-1043.
- [18] OTAKE H, TAYLOR C A, MATSUO H, et al. Noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography: Is this just another new diagnostic test or the long-awaited game changer?[J]. *Circulation Journal*, 2017, 81: 1085-1093.
- [19] 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]. *European Heart Journal*, 2015, 36: 3359-3367.
- [20] NØRGAARD B L, HJORT J, GAUR S, et al. Clinical use of coronary CTA-derived FFR for decision-making in stable CAD[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2017, 10: 541-550.
- [21] KIM K H, DOH J H, KOO B K, et al. A novel noninvasive technology for treatment planning using virtual coronary stenting and computed tomography-derived computed fractional flow reserve[J]. *JACC Cardiovascular Interventions*, 2014, 7: 72-78.
- [22] IHDAYHID A R, NØRGAARD B L, GAUR S, et al. Prognostic value and risk continuum of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary CT angiography[J]. *Radiology*, 2019, 292: 343-351.
- [23] PATEL M R, NØRGAARD B L, FAIRBAIRN T A, et al. 1-year impact on medical practice and clinical outcomes of FFR: The advance registry[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2020, 13: 97-105.
- [24] 孙欣杰, 徐怡, 朱晓梅, 等. 基于冠状动脉 CTA 的 FFR_{CT} 与斑块特征对冠心病患者主要不良心脏事件的预测价值[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2021, 27(4): 296-301.
- SUN X J, XU Y, ZHU X M, et al. The predictive value of coronary CTA-derived fractional flow reserve and atherosclerosis plaque characteristics for major adverse cardiac events in patients with coronary artery disease[J]. *Chinese Computed Medical Imaging*, 2021, 27(4): 296-301. (in Chinese).

- [25] ZHOU F, TANG C X, SCHOEPF U J, et al. Fractional flow reserve derived from CCTA may have a prognostic role in myocardial bridging[J]. *European Radiology*, 2019, 29: 3017-3026.
- [26] MICHAEL M, IHDAYHID A R, COMELLA A, et al. Feasibility and validity of computed tomography-derived fractional flow reserve in patients with severe aortic stenosis: The CAST-FFR study[J]. *Circulation. Cardiovascular Interventions*, 2021, 14: e009586.
- [27] PONTONE G, WEIR-McCALL J R, BAGGIANO A, et al. Determinants of rejection rate for coronary CT angiography fractional flow reserve analysis[J]. *Radiology*, 2019, 292: 597-605.
- [28] 中华医学会放射学分会心胸学组, 《中华放射学杂志》心脏冠状动脉多排 CT 临床应用指南写作专家组. 心脏冠状动脉 CT 血管成像技术规范应用中国指南[J]. *中华放射学杂志*, 2017, 51(10): 732-743.
- [29] XAPLANTERIS P, FOURNIER S, PIJLS N H J, et al. Five-year outcomes with PCI guided by fractional flow reserve[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2018, 379: 250-259.
- [30] FEARON W F, NISHI T, DE B B, et al. Clinical outcomes and cost-effectiveness of fractional flow reserve-guided percutaneous coronary intervention in patients with stable coronary artery disease: Three-year follow-up of the FAME 2 trial (Fractional flow reserve versus angiography for multivessel evaluation) [J]. *Circulation*, 2018, 137: 480-487.
- [31] CELENG C, LEINER T, MAUROVICH-HORVAT P, et al. Anatomical and functional computed tomography for diagnosing hemodynamically significant coronary artery disease: A meta-analysis[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2019, 12: 1316-1325.
- [32] RAJA J, SEITZ M P, YEDLAPATI N, et al. Can computed fractional flow reserve coronary CT angiography (FFRCT) offer an accurate noninvasive comparison to invasive coronary angiography (ICA)? "The Noninvasive CATH": A comprehensive review[J]. *Current Problems in Cardiology*, 2021, 46: 100642.

Progress in the Clinical Application of Fractional Flow Reserve Based on Coronary CT Angiography

LI Shihang¹, ZHANG Xiaoqin^{2✉}

1. Inner Mongolia Medical University, Huhhot 010110, China

2. Inner Mongolia People's Hospital, Huhhot 010017, China

Abstract: Noninvasive coronary fractional flow reserve derived from CT angiography (FFR_{CT}) is a major advance within cardiovascular imaging in recent years. It can identify pathology-specific ischemia and provide information for clinical decisions on revascularization, serving as a gatekeeper for invasive coronary angiography. This paper reviews the research progress of FFR_{CT} and briefly discusses its limitations.

Keywords: machine learning; coronary artery disease; fractional flow reserve; computational fluid dynamics



作者简介: 李诗航, 女, 内蒙古医科大学影像医学与核医学研究生, 主要研究方向为心胸影像诊断, E-mail: lishihang00@qq.com; 张晓琴[✉], 女, 内蒙古自治区人民医院主任医师, 主要从事介入及影像诊断工作, E-mail: xiaoqin1498@163.com。