・综述・

CT 心肌灌注成像新进展

马雪妍,张永高

【摘要】随着对心血管疾病研究的深入,越来越多的证据表明冠脉解剖狭窄与心肌功能并不呈正 比。在典型的缺血级联反应中,血流灌注异常最先出现,然后才出现代谢改变、室壁运动异常、心电图改 变和临床症状。CT 心肌灌注成像技术可评估心肌血流灌注的生理学信息,对临床决策的制讨及远期 预后的评估至关重要。近年来,CT 心肌灌注成像技术发展较快,在技术方面,低剂量、双能量扫描及人 工智能的应用是主要关注话题;在诊断方面,与 CT-血流储备分数(FFR)的对比、心肌病的诊断及预后 预测是主要研究方向。本文对心肌灌注成像的扫描方案及相关技术和其在诊断方面的临床应用进展进 行了总结和分析。

【关键词】 冠状动脉疾病; 心肌灌注成像; 体层摄影术, X 线计算机

【中图分类号】R814.42;R541.4 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2023)12-1628-06 DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.12.022 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



冠状动脉疾病(coronary artery disease, CAD)作 为全球最常见的心血管疾病之一,主要与冠状动脉斑 块破裂或冠状动脉狭窄引起的心肌缺血和缺氧有关。 目前,冠状动脉 CT 血管成像(coronary computed tomography angiography, CCTA)因其高敏感度、阴性 预测价值和无创性,已成为可疑 CAD 的一线检查手 段,尤其是在具有冠心病低至中度风险的患者中[1]。 然而,传统的 CCTA 仅能提供关于冠状动脉解剖的信 息,对冠脉血流动力学和心肌功能的诊断仍具有局限 性。既往有研究结果表明仅通过 CCTA 评估使有创 性的冠状动脉造影(invasive coronary angiography, ICA)的启用率增加了 50%,其中超过四分之一的患者 并无梗阻性冠心病[2]。心肌缺血的存在和程度决定了 心血管事件的发生及预后,并且能够指导血运重建[3]。 因此,除了对冠脉管腔解剖学改变进行评估之外,通常 还需要进行功能学检查,如 MRI、SPECT 和负荷超声 心动图[4-5]。但这些功能学评估方法增加了检查流程, 而且也各自具有一定的缺点,如 SPECT 检查的辐射 剂量高,心脏金属置入物患者不能进行 MRI 检查,超 声心动图检查对缺血的检测高度依赖于超声医师的操 作和诊断能力^[6]。

近年来,随着 CT 技术的不断发展,扫描方式从传 统电子束 CT 发展到双源双能 CT,探测器宽度从 16 排增至 320 排,图像的时间和空间分辨率不断提高,辐 射剂量降低,进一步推动 CT 心肌灌注成像(CT myocardial perfusion imaging,CT-MPI)检查技术不断发 展成熟而逐步应用于临床^[7]。心肌灌注是指流经心肌 组织内冠状动脉血管网的血流,可反映心肌微循环的 状态^[8]。

本文将对 CT 心肌灌注成像的扫描方案、技术特 点及诊断方向的新进展予以综述。

CT心肌灌注成像扫描方案

1. 静态及动态 CT-MPI

根据静脉注射对比剂后扫描时间的不同,有静态 及动态两种 CT-MPI 方法。静态 CT-MPI 是在对比 剂首次通过心肌时采集到单期相图像,通过观察单个 时间点心肌内对比剂或碘浓度的分布,可间接评估心 肌灌注情况^[9]。静态扫描的主要优势是辐射剂量低且 相比于动态扫描具有不逊色的诊断准确性,但其易受 运动及硬化伪影的干扰,因此要回顾分析多个心动周 期的图像以区分真正的灌注缺损与伪影。常规静态 CT-MPI 只能做视觉定性及半定量(跨壁灌注率)评 估。既往有研究表明,目测法评估较跨壁灌注率 (transmural perfusion ratio, TPR)的诊断效能更 高^[10],但这种定性评估高度依赖于正常灌注区作为参 考,因此不利于整体灌注减低人群中对心肌缺血区的 检出^[11]。动态 CT-MPI 是注射对比剂后扫描一系列 CT 图像,可显示心肌内对比剂流入和流出的全过程。 通过在注射后不同时间点的连续采样,按心肌碘分布 的动态变化,可获得时间-密度曲线(time-attenuation curve, TAC)。TAC的数学模型可以精确量化心肌灌 注程度。相较于静态 CT-MPI, 动态扫描可进行定量

作者单位:450052 河南郑州,郑州大学第一附属医院放射科

作者简介:马雪妍(1997-),女,河南濮阳人,硕士研究生, 主要从事心血管病影像学诊断工作。 通讯作者:张永高,E-mail:zyg01578@126.com

基金项目:河南省医学科技攻关省部共建重点项目 (SBGJ202102113)

评估,如测量心肌血流量(myocardial blood flow, MBF)、血容量(myocardial blood volume,MBV)和平 均通过时间(mean transit time,MTT)等定量参数,提 高了对心肌缺血的诊断敏感性及准确性,但检查的辐 射剂量也相应增高^[12]。

2. 静息及负荷扫描方案

心肌灌注缺损可以通过心肌中对比剂浓度的降低 来识别。在稳定的冠心病环境中,基于机体的自我调 节机制,心外膜冠状动脉狭窄导致小动脉前和小动脉 远端的阻力降低,以维持心肌的血液供应^[13]。静息状 态下,心外膜冠状动脉管腔内径狭窄达 90%时,MBF 仍可保持正常。然而,在负荷状态下,冠状动脉血管扩 张,MBF 增加数倍,导致冠脉狭窄区域心肌产生"被窃 血"现象,当血液分流严重时即表现为心肌缺血。因此 负荷态扫描对于心肌功能的评估尤为重要。

CT-MPI 扫描流程通常分为两种:①静息态 CCTA、负荷 CT-MPI 扫描;②负荷 CT-MPI、静息态 CCTA。在以上扫描结束后还可间隔 5~10 min 再进 行延迟期扫描。对于轻症患者,推荐首先进行静息 CCTA 扫描,以评估冠脉血管狭窄程度,如果结果提 示为轻度或无狭窄患者,则可避免进行不必要的负荷 检查。但对比剂的残留污染会对负荷 CT-MPI 的检 查结果产生影响,因此二种检查之间应间隔 20 min,以 充分完成对比剂洗脱。对于高度怀疑冠心病的患者, 则建议优先进行负荷 CT-MPI 扫描,这样不会受到对 比剂的影响,对缺血的敏感性更高。延迟扫描是一种 简易的评估心肌存活情况、检出心肌梗死和纤维化的 技术。正常心肌在延迟强化时表现为强化程度逐渐减 弱,而梗死心肌由于细胞膜的破坏,对比剂渗透进入逐 渐扩大的心肌细胞外间隙并聚积,对比剂清除时间较 正常心肌慢,因此梗死心肌呈高密度^[14]。

技术方面的应用和进展

1. 低剂量扫描

CCTA和CT-MPI分别扫描会增加对比剂的使 用量和辐射剂量。尤其动态CT-MPI涉及多个连续 相位的采集,因此辐射剂量是影响CT-MPI推广使用 的一个重要问题。有文献报道负荷动态CT-MPI扫 描方案的有效辐射剂量范围为9.1~17.7mSv,静态 CT-MPI为0.93~9.8mSv^[15]。因此降低辐射剂量, 同时保持血流定量成像的准确性是目前技术方面的首 要任务。Yi等^[16]采用第三代双源CT机在管电压 70kV和管电流300mAs条件下进行CT-MPI检查, 并从中提取单期图像重建获得CCTA图像,实现低剂 量"一站式"扫描。将CT-MPI与单期CCTA结合,对 冠脉血流动力学异常的诊断符合率高达90.2%,而且 将 CT-MPI 基于血管的诊断敏感度和阴性预测值分 别从 77.8%和 88.1%提高至 84.1%和 91.2%,且该 研究中平均有效辐射剂量仅为 3.85 mSv。Liu 等[17] 在宽体探测器 CT 机前瞻性静态 CT-MPI 研究中,与 120 kV 组(传统 CCTA)相比,80 kV 组("一站式"CT-MPI)的辐射剂量和对比剂用量分别减少了 11.5%和 3.7%,使用"一站式"CT-MPI 检查可以在不损失主要 冠状动脉图像质量的情况下,获得有关心肌灌注和心 脏功能的额外诊断信息,并且在高心率组结论一致。 高心率时由于运动所致的阶梯状错位伪影可显著影响 图像质量,其是影响 CCTA 图像质量的主要原因之 一。256 排 CT 机具有 160 mm 宽的探测器覆盖范围 结合 0.28 s/r 的机架转速,可实现单次心跳周期内完 成图像采集。其次,心脏冷冻技术(snapshot freeze, SSF)可能在校正运动伪影和提高时间分辨率方面具 有重要意义,以及 ASIR-V 算法进一步优化了图像质 量,使得低剂量"一站式"CT-MPI 检查成为可能^[18-19]。 Møller 等^[20]首次指出通过降低 CT-MPI 采样率,可减 低辐射剂量且不影响动态 CT-MPI 心肌 MBF 值的评 估。每2个R-R 间期(2RR)的采集方案导致平均有 效辐射剂量在静息和负荷 CT-MPI 时分别为(5.7± 1.8)和(6.0±2.0)mSv。使用 2R-R 或 3R-R 采样率, 辐射剂量分别降低 35.4% ± 3.8% 和 47.3% ± 5.1%。

需要指出,目前大多数有关低剂量 CT-MPI 扫描的研究主要针对的是正常体重的患者,低管电压及一站式 CT-MPI 扫描对大体重患者是否同样有效尚待进一步研究。

2. 人工智能技术的应用

在心脏成像领域,人工智能技术在图像采集、图像 报告至预后分层等方面均具有较高的应用价值。van Hamersvelt 等^[21]对冠脉中度狭窄患者的 CCTA 图像 采用深度学习(deep-learning, DL)方法提取左心室心 肌的形状、纹理和对比增强等信息的编码特征,指出管 腔狭窄程度结合心肌纹理特征的 DL 分析可以提高对 中度冠状动脉狭窄患者心肌缺血预测的特异度。近 期, Muscogiuri 等^[22]的研究中以血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)为金标准,运用卷积神经网 络 DL 算法进一步对 112 例患者的静息和负荷状态下 的 CT-MPI 数据集进行训练以预测心肌缺血,结果显 示 DL 算法对心肌缺血的诊断具有较高的诊断准确性 且分析时间更短(<1 min)。将静息和负荷 CT-MPI 的 DL 分析结果与 CCTA 诊断结果相结合后,对心肌 缺血的诊断效能得到明显的提高。DL 算法分析结果 的 AUC、诊断符合率和阴性预测值分别为 96%、84% 和 100 %。Han 等^[23] 基于机器学习方法分析了 252 例 疑似冠心病患者的静息 CT-MPI 数据,其研究结果显

示,在 CCTA 信息中加入静息 CT-MRI 资料后,诊断 冠脉功能性显著狭窄的 AUC 显著增加,从 0.68(95% CI:0.62~0.74)增加至 0.75(95%CI:0.69~0.81), 预测心肌缺血有良好的增益。

人工智能技术在心血管影像领域的应用已有众多 研究,凭借其强大的数据分析能力,不仅能快速地完成 图像分析步骤,从而达到节约时间成本、提高诊断准确 性的目的,而且也逐步进入预测疾病预后和辅助诊疗 决策等临床应用领域。然而,人工智能技术在心肌灌 注领域的应用还属于初步阶段,且目前的大多数研究 为小样本数据,未来还需要更大样本量的多中心研究 以进一步验证及扩大人工智能技术在诊断心肌缺血方 面的应用。

3. 双能量 CT 技术

双能 CT (dual-energy computed tomography, DECT)同时使用高能和低能 X 射线,允许根据不同能 量水平下的唯一衰减值对材料和组织的特征进行量 化^[24]。双能 CT-MPI 与传统的基于 CT 值的诊断相 比,灌注成像中在碘密度图上图像对比度的增加更明 显,有助于更直观地评估心肌的血流灌注情况和潜在 的缺血或梗死区^[25]。近年来 DECT 在 CT-MPI 的应 用也从定性评估拓展到定量评估^[26]。Ruiz-Muñoz 等^[27]首次从基于 CT 的碘图像中对 TPR、心肌灌注储 备指数(myocardial perfusion reserve index,MPRI)和 平均密度衰减(mean attenuation density, MA)进行了 定量分析,显示基于双能量碘图的 TPR 识别心肌缺血 的敏感度较常规阅片分析(视觉评估)更高,评估效果 更佳。此外,双能量 CT 碘图可以减少图像伪影的干 扰,减少假阴性率,对心肌视觉评估效果优于单能量 CT。van Assen 等^[28]以心脏 MRI 为对照,评估静息-负荷 DECT 碘定量在鉴别正常、缺血和梗死心肌方面 的潜力,研究结果显示在静息态及负荷态时缺血及梗 死心肌的碘值均显著低于正常心肌,碘值 1.0 mg/mL 是鉴别心肌缺血和梗死的最佳阈值。Scherer 等^[29]首 次使用双层光谱 CT 机对健康猪模型静息状态下的心 肌血流动力学情况进行了定量分析,得出低能量虚拟 Mono-Kev 图像和碘密度图在显示造影剂通过后的心 肌密度改变方面优于常规 CT 图像。此外,使用半静 态两次激发方法定量评估心肌达峰碘值的效能良好, 而且作者推测通过对数据的建模可将对比剂的用量或 浓度增加2倍。由于此研究中使用的CT机仅提供 4.0 cm的探测器覆盖范围,对心肌检查范围有限,可能 会遗漏部分血流灌注缺损区域。未来还需要在更高端 的多参数功能 CT 机上做进一步探索。

DECT 的应用丰富了静态 CT-MPI 的量化指标, 并在一定程度上提升了视觉评估的准确性。未来需要 更大的多中心研究来进一步验证 DECT 在 CT-MPI 方面的诊断准确性。而且,由于此项检查的辐射剂量 相较于单能量 CT 扫描有所提高,因此有必要进一步 细化和准确选择受益人群。

诊断方面的应用和进展

1. 与 CT-血流储备分数的对比

鉴于 CCTA 在可疑或确诊冠心病患者的应用越 来越多,从单个 CCTA 评估解剖和血流动力学意义的 能力有可能加强和简化风险分层和临床决策。近年 来,基于 CT 对心肌功能进行评估的技术除了心肌灌 注成像,应用最广泛、最有前景的是基于 CT 的血流储 备分数(CT-FFR)定量分析技术,使用传统的 CCTA 数据模拟特定病变的 FFR 值^[30]。在最新的一项中国 多中心临床研究中,对 338 例疑似冠心病患者的 CTA 和侵入性 FFR 测量数据进行了回顾性分析,基于每支 血管的 CT-FFR 的诊断符合率为 91%,并且在冠脉中 度狭窄、CT-FFR 为 0.76~0.80(灰区)及高钙化积分 (≥400)人群中也具有较高的诊断符合率^[31]。

动态 CT-MPI 可以定量心肌 MBF 的绝对值,对 诊断缺血性冠状动脉狭窄具有很高的准确性。然而, 它的缺点是需要额外的图像采集和使用血管扩张剂, 这导致相对较高的辐射剂量和对比剂消耗^[32]。CT-FFR 只能提供心外膜下冠状动脉病变的信息,不能直 接测量左室心肌水平的微血管疾病,尤其在存在冠脉 弥漫性钙化病变或图像质量受损的情况下,其临床价 值可能有限[33]。因此二者的最佳适用条件及诊断准 确性的对比是近年来的主要研究方向。Li 等^[32]对 86 例患者的 157 支冠脉目标血管的分析中发现,动态 CT 心肌灌注成像获得的心肌 MBF 值在识别心肌缺 血病变方面优于基于机器学习方法获得的 CT-FFR 值,尤其是对于冠脉中度狭窄的患者。Coenen 等^[34] 的研究结果显示 CT-MPI 和 CT-FFR 在检出功能性 显著冠心病方面的准确性相当,二者联合后可进一步 提高诊断准确性。Dai 等^[35]对 CT-FFR 和 CT-MPI 进行了对比研究,首次提示对于血管横断面图像上管 壁钙化范围>180°的病变,CT-FFR 的诊断能力明显 较差,因此病变处的钙化形态可能是指导评估冠脉狭 窄血流动力学方法的重要参数。Yu 等[36] 对 142 例具 有中高度冠心病风险的患者行动态 CT-MPI、CT-FFR 及斑块分析并对其进行至少1年的随访,结果显示 MBF 值对主要不良心血管事件(major adverse cardiovascular events, MACE)的预测效能最佳,并且在 预测不良临床结局事件方面优于高危斑块征象及 CT-FFR_。

CT-FFR 测量与 CT-MPI 是相辅相成而不是互为

竞争的关系,未来需要进一步探索两者的最佳适用及 补充条件,尤其是对于高钙斑负荷、支架术后及微循环 障碍的患者。

2. 特殊类型心肌病

心脏淀粉样变性(cardiac amyloidosis,CA)的病 理特征是淀粉样蛋白在心肌组织中沉积,导致心壁进 行性增厚和舒张期功能障碍^[37]。虽然目前 CA 的首 选无创性检测手段是 MRI。但 Chevance 等^[38]采用 DECT 机行 CCTA 及延迟增强扫描,得出心肌碘浓度 对 CA 患者心肌受累情况具有良好的诊断效能,因此 对于疑似 CA 患者,如存在心脏 MRI 检查禁忌证, DECT 可能可以作为一种替代诊断工具。而 Deux 等^[39]首次将动态 CT-MPI 联合延迟扫描应用于 CA 患者的心肌功能及预后评估,结果显示:无论淀粉样变 性的类型如何,均存在冠状动脉微血管分支功能障碍, 心肌细胞外体积(extracellular volume,ECV)显著增 加,而且 ECV 和 CT 灌注参数与 CA 患者的预后相 关。该研究拓展了 CT-MPI 的应用范围,对常见的冠 心病至少见的心肌病的诊断都具有较高的临床意义。

目前 CT-MPI 对缺血性心肌损伤以外的领域研 究甚少,未来还需要对其在其它类型心肌病诊断方面 的作用进行探索。

3. 对预后的预测价值

CT-MPI不仅在心肌缺血或梗死的诊断中具有较高的临床价值,对于冠心病及支架置入术后患者的预后评估方面也具有较高的临床价值。

Dewey 等^[40]在 CORE-320 多中心研究中对于疑 似冠状动脉疾病的患者进行5年 MACE 随访,该研究 指出 CTA-CTP 联合评估与 ICA-SPECT 联合评估的 5年预后结果相似。因此,考虑到 CT 的非侵入性,以 及操作的便携性,CTA-CTP 的组合可能是评估可疑 冠心病患者预后的优质方案。van Assen 等^[41]对 81 例冠心病患者行 CCTA、CT-MPI 检查和 CT-FFR 分 析,分别在 6、12 和 18 个月后随访 MACE,结果显示: 相较于 CCTA 和 CT-FFR, 动态 CT-MPI 对 MACE 的预后价值最高,且与临床危险因素无显著相关性。 Nakamura 等^[42]指出在支架植入术后、重度钙化以及 梗阻性 CAD 患者组中,相较于 CCTA,动态负荷 CT-MPI+延迟强化对预后评估具有较高的价值,并且延 迟强化扫描有助于鉴别缺血及瘢痕心肌,二者是产生 不良预后的独立预测因子,可能在预后分层中有互补 作用。

经皮冠状动脉介入治疗(percutaneous coronary intervention, PCI)是目前全世界范围内治疗冠心病的最常见的血管重建术。相较于心肌梗死,心肌缺血患者更有可能从早期血运重建中受益。然而,并不是所

有患者都能完全恢复缺血心肌的 MBF,因此对 PCI 术 后的检测也尤为重要[43-44]。由于金属支架产生伪影的 影响,CCTA对支架内管腔的评估效果欠佳^[45]。Andreini 等^[46]对 150 例支架置入术后患者进行评估,结 果显示在支架内再狭窄的诊断中 CT-MPI 的特异性 及诊断准确性均高于 CCTA, 而且冠脉 CTA 联合静 态负荷 CT-MPI 的辐射剂量仅为(4.15±1.50) mSv。 在药物洗脱支架时代,与裸金属支架相比,支架内再狭 窄的发生率显著降低,但 PCI 术后患者出现心绞痛或 不典型胸痛的情况也并不少见。Li 等[47] 通过对 37 例 支架通畅但出现心前区不适的患者进行研究,认为动 态 CT-MPI 在识别此类人群中潜在的微血管功能障 碍方面可能是一种较传统临床参数更有价值的方法。 此外,Kim 等^[48] 从经济角度对 PCI 术后可疑梗阻性 CAD 或支架内再狭窄病变的成本-效益进行分析,发 现 CT-MPI 具有良好的成本-效益。

CT-MPI是唯一一中可以同时获得心脏解剖学和 功能学信息的非侵入性检查方法。在技术方面:不同 重建算法在保证图像质量的同时实现低辐射剂量扫 描;人工智能技术的应用在保证诊断准确性的同时缩 短了诊断分析时间;双能量扫描模式可以使得静态 CT-MPI具有定量评估能力并且能提高定性评估价 值。在诊断方面:相较于 CT-FFR 应用条件更宽,诊 断准确性更高;联合延迟扫描对于心肌淀粉样变性的 诊断及死亡率的预测方面具有较高价值;对于冠心病 及支架置入术后患者,可以评估其预后并指导临床决 策。由于 CT-MPI 在冠心病中的应用价值既往已有 较多文献对其进行了分析和总结,故本文未对此领域 予以综述。

综上所述,CT 心肌灌注在技术及诊断方面的应 用价值已被多方面研究。除了辐射剂量及扫描流程的 复杂性,目前技术、方法、以及个体间的差异也是限制 CT-MPI 普适性发展的主要原因。未来需要更多前瞻 性的多中心研究来验证 CT-MPI 的稳定性和可重复 性。

参考文献:

- [1] Yu M, Shen C, Dai X, et al. Clinical outcomes of dynamic computed tomography myocardial perfusion imaging combined with coronary computed tomography angiography versus coronary computed tomography angiography-guided strategy[J/OL]. Circ Cardiovasc Imaging, 2020, 13(1): e009775[2020-01-08]. DOI: 10. 1161/ CIRCIMAGING. 119. 009775.
- [2] Douglas PS, Hoffmann U, Patel MR, et al. Outcomes of anatomical versus functional testing for coronary artery disease[J]. N Engl J Med, 2015, 372(14):1291-1300.
- [3] Dai X, Yu Y, Yu L, et al. Design and rationale of randomized CT-PRECISION study[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2021, 11(3): 760-

767.

1632

- [4] Piekarski E, Manrique A, Rouzet F, et al. Current status of myocardial perfusion imaging with new SPECT/CT cameras[J]. Semin Nucl Med, 2020, 50(3): 219-226.
- [5] Patel AR, Salerno M, Kwong RY, et al. Stress cardiac magnetic resonance myocardial perfusion imaging: JACC review topic of the week[J]. J Am Coll Cardiol, 2021, 78(16): 1655-1668.
- [6] Villemain O, Baranger J, Jalal Z, et al. Non-invasive imaging techniques to assess myocardial perfusion [published correction appears in Expert Rev Med Devices][J]. Expert Rev Med Devices, 2020,17(11):1133-1144.
- [7] Nieman K, Balla S. Dynamic CT myocardial perfusion imaging[J].J Cardiovase Comput Tomogr, 2020, 14(4): 303-306.
- [8] 王成英,孙凯,吕滨. CT 动态负荷心肌灌注临床研究进展[J]. 放 射学实践,2017,32(5):542-546.
- [9] Mushtaq S,Conte E,Pontone G,et al. State-of-the-art-myocardial perfusion stress testing: static CT perfusion [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr,2020,14(4):294-302.
- [10] Punzo B, Cavaliere C, Maffei E, et al. Narrative review of cardiac computed tomography perfusion: insights into static rest perfusion[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2020, 10(6): 1946-1953.
- [11] Pontone G, Andreini D, Guaricci AI, et al. Quantitative vs. qualitative evaluation of static stress computed tomography perfusion to detect haemodynamically significant coronary artery disease [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging,2018,19(11):1244-1252.
- [12] Assen MV, Vonder M, Pelgrim GJ, et al. Computed tomography for myocardial characterization in ischemic heart disease: a stateof-the-art review[J/OL]. Eur Radiol Exp, 2020, 4(1): e36[2020 Jun 17]. DOI:10.1186/s41747-020-00158-1.
- [13] Dewey M, Siebes M, Kachelrieß M, et al. Clinical quantitative cardiac imaging for the assessment of myocardial ischaemia[J]. Nat Rev Cardiol, 2020, 17(7): 427-450.
- [14] Rodriguez-Granillo GA. Delayed enhancement cardiac computed tomography for the assessment of myocardial infarction; from bench to bedside[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2017, 7 (2); 159-170.
- Li Y, Speidel MA, Francois CJ, et al. Radiation dose reduction in CT myocardial perfusion imaging using SMART-RECON[J].
 IEEE Trans Med Imaging, 2017, 36(12):2557-2568.
- [16] Yi Y,Xu C,Wu W,et al. Low-dose CT perfusion with combined use of CTP and CTP-derived coronary CT angiography at 70kVp:validation with invasive fractional flow reserve[J]. Eur Radiol,2021,31(2):1119-1129.
- [17] Liu K, Diao K, Hu S, et al. Achieving low radiation dose in "One-Stop" myocardial computed tomography perfusion imaging in coronary artery disease using 16cm wide detector CT[J]. Acad Radiol, 2020, 27(11):1531-1539.
- [18] Liang J, Wang H, Xu L, et al. Impact of SSF on diagnostic performance of coronary computed tomography angiography within 1 heart beat in patients with high heart rate using a 256-row detector computed tomography [J]. J Comput Assist Tomogr, 2018,42(1):54-61.
- [19] Gatti M, Marchisio F, Fronda M, et al. Adaptive statistical iterative reconstruction-V versus adaptive statistical iterative reconstruction; impact on dose reduction and image quality in body

computed tomography[J]. J Comput Assist Tomogr, 2018, 42
(2):191-196.

- [20] Møller MB, Sørgaard MH, Linde JJ, et al. Optimization of image sampling rate to lower the radiation dose of dynamic myocardial CT perfusion[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2021, 15(5): 457-460.
- [21] van Hamersvelt RW,Zreik M,Voskuil M, et al. Deep learning analysis of left ventricular myocardium in CT angiographic intermediate-degree coronary stenosis improves the diagnostic accuracy for identification of functionally significant stenosis[J]. Eur Radiol,2019,29(5):2350-2359.
- [22] Muscogiuri G. Chiesa M. Baggiano A, et al. Diagnostic performance of deep learning algorithm for analysis of computed tomography myocardial perfusion[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2022,49(9):3119-3128.
- [23] Han D, Lee JH, Rizvi A, et al. Incremental role of resting myocardial computed tomography perfusion for predicting physiologically significant coronary artery disease: a machine learning approach[J]. J Nucl Cardiol, 2018, 25(1); 223-233.
- [24] Shao J, Jiang JS, Wang XY, et al. Measurement of myocardial extracellular volume using cardiac dual-energy computed tomography in patients with ischaemic cardiomyopathy: a comparison of different methods[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2022; e10. 1007/s10554-022-02532-z[published online ahead of print, 2022 Feb 24]. DOI:10.1007/s10554-022-02532-z.
- [25] Ruiz-Muñoz A, Valente F, Dux-Santoy L, et al. Diagnostic value of quantitative parameters for myocardial perfusion assessment in patients with suspected coronary artery disease by single- and dual-energy computed tomography myocardial perfusion imaging [J/OL]. Int J Cardiol Heart Vasc, 2021, 32:e100721[2021 Feb 4]. DOI:10.1016/j. ijcha. 2021. 100721.
- [26] Pelgrim GJ, van Hamersvelt RW, Willemink MJ, et al. Accuracy of iodine quantification using dual energy CT in latest generation dual source and dual layer CT[J]. Eur Radiol, 2017, 27(9): 3904-3912.
- [27] Ruiz-Muñoz A, Valente F, Dux-Santoy L, et al. Diagnostic value of quantitative parameters for myocardial perfusion assessment in patients with suspected coronary artery disease by single- and dual-energy computed tomography myocardial perfusion imaging [J/OL]. Int J Cardiol Heart Vasc, 2021, 32:e100721[2021 Feb 4]. DOI:10.1016/j. ijcha. 2021.100721.
- [28] van Assen M, Lavra F, Schoepf UJ, et al. Iodine quantification based on rest/stress perfusion dual energy CT to differentiate ischemic, infarcted and normal myocardium [J]. Eur J Radiol, 2019,112:136-143[2019 Jan 16]. DOI: 10. 1016/j. ejrad. 2019. 01. 017.
- [29] Scherer K, Hammel J, Sellerer T, et al. Dynamic quantitative iodine myocardial perfusion imaging with dual-layer CT using a porcine model[J/OL]. Sci Rep, 2019, 9(1): e16046[2019 Nov 5]. DOI:10.1038/s41598-019-52458-1.
- [30] Khav N, Ihdayhid AR, Ko B. CT-derived fractional flow reserve (CT-FFR) in the evaluation of coronary artery disease[J]. Heart Lung Circ, 2020, 29(11):1621-1632.
- [31] Tang CX, Liu CY, Lu MJ, et al. CT FFR for ischemia-specific CAD with a new computational fluid dynamics algorithm: a Chi-

nese multicenter study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13
(4):980-990.

- [32] Li Y, Yu M, Dai X, et al. Detection of hemodynamically significant coronary stenosis: CT myocardial perfusion versus machine learning CT fractional flow reserve[J]. Radiology, 2019, 293(2): 305-314.
- [33] Peper J, Suchá D, Swaans M, et al. Functional cardiac CT-going beyond anatomical evaluation of coronary artery disease with cine CT, CT-FFR, CT perfusion and machinelearning [J/OL]. Br J Radiol, 2020, 93 (1113): e20200349 [2020 Aug 12]. DOI: 10. 1259/bjr. 20200349.
- [34] Coenen A, Rossi A, Lubbers MM, et al. Integrating CT myocardial perfusion and CT-FFR in the work-up of coronary artery disease[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2017, 10(7): 760-770.
- [35] Dai X,Lu Z,Yu Y,et al. The use of lesion-specific calcium morphology to guide the appropriate use of dynamic CT myocardial perfusion imaging and CT fractional flow reserve[J]. Quant Imaging Med Surg,2022,12(2):1257-1269.
- [36] Yu L, Lu Z, Dai X, et al. Prognostic value of CT-derived myocardial blood flow, CT fractional flow reserve and high-risk plaque features for predicting major adverse cardiac events[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2021, 11(4):956-966.
- [37] Manolis AS, Manolis AA, Manolis TA, et al. Cardiac amyloidosis: an underdiagnosed/underappreciated disease[J/OL]. Eur J Intern Med, 2019, 67: e1-e13[2019 Jul 30]. DOI: 10. 1016/j. ejim. 2019. 07. 022.
- [38] Chevance V, Damy T, Tacher V, et al. Myocardial iodine concentration measurement using dual-energy computed tomography for the diagnosis of cardiac amyloidosis: a pilot study [J]. Eur Radiol,2018,28(2):816-823.
- [39] Deux JF, Nouri R, Tacher V, et al. Diagnostic value of extracellular volume quantification and myocardial perfusion analysis at CT in cardiac amyloidosis[J]. Radiology, 2021, 300(2): 326-335.
- [40] Dewey M, Rochitte CE, Ostovaneh MR, et al. Prognostic value of noninvasive combined anatomic/functional assessment by cardiac CT in patients with suspected coronary artery disease-comparison with invasive coronary angiography and nuclear myocardial perfusion imaging for the five-year-follow up of the CORE320

multicenter study[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2021, 15 (6):485-491.

- [41] van Assen M, de Cecco CN, Eid M, et al. Prognostic value of CT myocardial perfusion imaging and CT-derived fractional flow reserve for major adverse cardiac events in patients with coronary artery disease[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2019, 13(3); 26-33.
- [42] Nakamura S, Kitagawa K, Goto Y, et al. Prognosticvalue of stress dynamic computed tomography perfusion with computed tomography delayed enhancement [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(8): 1721-1734.
- [43] Li Y, Yuan M, Yu M, et al. Prevalence of decreased myocardial blood flow in symptomatic patients with patent coronary stents: insights from low-dose dynamic CT myocardial perfusionimaging [J]. Korean J Radiol, 2019, 20(4):621-630.
- [44] Schumacher SP, Stuijfzand WJ, Driessen RS, et al. Impact of specific crossing techniques in chronic total occlusion percutaneous coronary intervention on recovery of absolute myocardial perfusion[J/OL]. Circ Cardiovasc Interv, 2019, 12(11):e008064[2019 Nov 1]. DOI: 10. 1161/CIRCINTERVENTIONS. 119. 008064.
- [45] Dai T. Wang JR. Hu PF. Diagnostic performance of computed tomography angiography in the detection of coronary artery instent restenosis: evidence from an updated meta-analysis[J]. Eur Radiol, 2018, 28(4): 1373-1382.
- [46] Andreini D. Mushtaq S, Pontone G, et al. CT perfusion versus coronary CT angiography in patients with suspected in-stent restenosis or CAD progression[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020,13(3):732-742.
- [47] Li Y, Yuan M, Yu M, et al. Prevalence of decreased myocardial blood flow in symptomatic patients with patent coronary stents: insights from low-dose dynamic CT myocardial perfusion imaging [J]. Korean J Radiol, 2019, 20(4):621-630.
- [48] Kim SH, Rübenthaler J, Nörenberg D, et al. Cost-effectiveness of stress CTP versus CTA in detecting obstructive CAD or in-stent restenosis in stented patients[J]. Eur Radiol, 2021, 31(3):1443-1450.

(收稿日期:2022-09-18 修回日期:2022-12-13)