



• RSNA2013 聚焦 •

RSNA2013 心脏大血管影像学

李志伟, 袁思殊, 夏黎明

【中图分类号】R445.2; R814.42 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2014)02-0110-10

【关键词】心脏; CT 血管成像; 磁共振成像; 辐射剂量

2013 心脏大血管部分的研究重点在辐射剂量的减低, 现简要介绍如下。

冠脉 CTA

对辐射剂量、对比剂剂量的控制一直是冠脉 CTA(CCTA、CTCA)研究的热点。

1. 辐射剂量的减低

目前很多研究中一次 CCTA 扫描的有效辐射剂量已控制在亚 mSv 水平内, 迭代重建(IR)算法能够降低图像的噪声, 从而允许使用更低剂量的扫描方案, 近年来很多学者在这方面做了大量的研究工作。迭代算法在降低噪声的同时, 对冠脉钙化积分(CACS)的计算是否会产生一定的影响亦有所争议。高敏感性探测器、根据患者的心电图和体型调整管电流等方法亦有应用。Fuminari 等使用 320 排 CT 对 30 例怀疑冠心病的患者进行扫描, 与滤波反投影(FBP)法相比, 高水平 3D 自适应迭代算法(3D AIDR)可减少 CACS 扫描 66% 的辐射剂量, 且不影响冠脉钙化积分的定量分析。

Kurata 等使用 128 排双源 CTsonogram-affirmed 迭代重建算法(sonogram-affirmed iterative reconstruction, SAFIRE)对 CCS 评分的影响。发现 SAFIRE 降噪技术明显影响钙化积分的定量计算(钙化评分明显下降), 可能对临床存在潜在的影响。因此认为 IR 技术不宜用于钙化积分的评估。Kimura 等对 340 例患者进行冠脉积分的评估, 发现与 FBP 相比, 图像噪声、冠脉钙化积分、冠脉钙化体积随着自适应统计迭代重建(ASiR)百分比(30%~100%)的增加而减少(5.3%~17.7%)。高百分比的 ASiR 可能导致对低 CACS 患者风险的低估, 不超过 50% 的 ASiR 的可将 CACS 的减少控制在约 15%。因此推荐 ASiR 在 50% 是合适的评估方法。

Zhou 等发明一种心脏 CT 的图像空间滤波, 可一部分时间描绘非局部方式(partial temporal profile non-local means, PATEN), CT 数据集利用 PATEN 滤波可减少 21.7% 的图像噪声, 减少 70.0% 的心动周期剂量期相, 且不影响时间和空间分辨率。Seitaro 等使用采用知识型迭代模型重建(knowledge-based iterative model reconstruction, IMR)处理低管电压前瞻性门控 CCTA 数据, 与滤波反投影(FBP)和混合迭代重建(HIR)图像质量相比, 前者可明显定性、定量的改善图像质量, 从而降低辐射剂量。

Julian 等对 100 例 CCTA 的患者研究发现, 不论对于心率大于 65 次/分的患者, 还是心率正常或心率不齐的患者, 使用双源 DSCT 扫描仪第二代 128 排双源 CT 扫描仪回顾性心电门控方式行 CCTA 能明显减低辐射剂量同时保证诊断图像质量。高频螺旋模式比连续采集模式辐射剂量减半。

Shen 等使用自行开发的基于噪声的管电流减低技术, 使用前瞻性心电门控和迭代算法重建, 得到的图像与固定管电流法和 FBP 重建法相比, 前者在控制图像噪声的基础上能保证图像质量, 同时有效辐射剂量降低超过 50%。

Nakaura 等使用迭代重建算法(IMR)加低 kVp 进行 CCTA 扫描, 每次扫描的有效辐射剂量(ED)为 0.98 mSv, 明显低于 FBP 和 iDose⁴。然而, 这种降低与 IMR 重建技术的关系并不明显。针对模型的研究表明, 每种重建方法的图像噪声和扫描目标的尺寸有指数回归关系, IMR 重建方法的图像噪声受扫描目标尺寸影响的程度低于 FBP 和 iDose⁴ 约 36%。因此, 与 FBP 和 iDose⁴ 相比, 对不同体型的患者, IMR 重建提供了稳定的和很大程度的降噪。

Liu 对 60 例患儿(2 个月~13 岁)使用 3 种不同的 CCTA 扫描模式: 管电压均为 80 kV, A 组使用固定的 350 mA, B 组使用 ECG 调制的 mA(40%~80% R-R 期相为 350 mA, 其他期相为 70 mA), C 组使用患者依赖的 ECG 调制(patient-dependent mA selection scheme for ECG modulation)的 mA 选择。患者依赖的 mA 选择方法是基于预扫描图像上测量每例患者的 CT 值。三组的图像噪声无明显差异, 有效辐射剂量 C 组最低, 比 A 组减少了 47%(分别为 4.39、3.23 和 2.34 mSv)。因此认为回顾性 CCTA 使用低 kVp 和患者依赖的 mA 选择法在保证图像质量的同时, 辐射剂量最低。

Puchner 等体外采集 7 条冠状动脉的 CCTA 和血管内超声(IVUS)数据。CT 图像使用滤波反投影法(FBPR)、自适应统计(ASIR)和基于模型的(MBIR)迭代重建算法, 每种重建算法行全自动(无手动调整)及半自动(允许自动调整血管边界)斑块负荷评估。发现以 IVUS 为参考标准, MBIR 算法、半自动评价斑块负荷比 ASiR 和 FBPR 更精确。因此认为基于模型的重建算法(MBIR)能进一步加强冠脉 CTA 作为非侵入性方法对冠心病患者进行风险分级的工具。

Puchner 等从 3 个离体的心脏采集 CCTA 和组织学数据。CT 图像使用滤波反投影(FBPR)法、自适应统计迭代(ASIR)、基于模型的迭代(MBIR)重建算法。CCTA 数据和组织学断层配准。分析发现无论何种重建算法, CCTA 上斑块区 < 60 HU 与脂质核心斑块(LCP)(定义为任何纤维粥样瘤伴脂肪/坏死核心, 直径大于 200 μ m, 圆周 > 60°, 且组织学上帽 < 450 μ m)有

作者单位: 430030 武汉, 华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科

作者简介: 李志伟(1985—), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事心脏 MR 成像工作。

关。而 MBIR 在探测 LCP 方面表现出很高的准确性、特异性,可能提高 CCTA 在患者风险分级方面的价值,进一步加强 CCTA 作为一种非侵入性探测和鉴别易损斑块工具的作用。

Kidoh 等使用新的胸痛三联成像心脏 CTA(TRO-CTA)方法:回顾性心电门控冠脉扫描后,再行无心电门控的全胸 CTA(80 kVp)。与常规方法(120 kVp,回顾性心电门控)相比,新的 TRO-CTA 扫描方法能有效减少辐射剂量 $[(23.5 \pm 2.6) \text{ mSv vs } (33.4 \pm 1.4) \text{ mSv}, P < 0.01]$ 、对比剂用量 $[(60.1 \pm 9.6) \text{ mL vs } (91.8 \pm 22.6) \text{ mL}, P < 0.01]$,且升主动脉(AAo)的 CNR 高于常规方法 30.2% ($P < 0.01$),而血管增强效果与常规方法相同。Wang 等使用 3 种模式的双源 CT CCTA 扫描:前瞻性心电触发连续扫描模式、回顾性心电门控螺旋扫描模式、Flash 螺旋扫描模式。与回顾性模式和 Flash 模式相比,前瞻性心电触发连续扫描模式图像质量更好,辐射剂量更低,是 CTA 成像的首选。Fuchs 等比较标准低剂量 CCTA(100~120 kV, 450~700 mA)和基于模型的迭代重建算法(MBIR)的超低剂量(ULD)CCTA(80~100 kV, 150~210 mA)扫描方案,发现 MBIR 能有效的补偿超低剂量(ULD) CCTA 增高的噪声。低管电压下对比剂的 CT 值更高,因此信噪比较标准 CCTA 亦增高。

心脏同种异体移植后血管病变是术后患者死亡的主要原因。CCTA 能非侵入性的有效的诊断心脏同种异体移植后的血管病变,但缺点是有辐射。降低心脏移植患者 CCTA 的辐射剂量是很有挑战的,因为患者心率常常很快。Wolf 等使用双源 CT 对 150 例心脏移植术后患者使用 3 种扫描模式:第 1 组使用常规的回顾性心电门控螺旋采集(120 kV/320 mA,管电流调制技术);第 2 组使用前瞻性心电门控(120 kV/320 mA, 40%~70% RR 间期),第 3 组使用前瞻性心电门控在收缩期采集,并使用自动管电流选择技术(自动 kV, RR 间期 35%~45%)。分析发现心脏移植患者的辐射剂量可通过心电门控收缩期连续扫描和自动管电压选择技术来明显减低,且图像质量无明显降低。Ma 等对正常 BMI 的患者($20.5 < \text{BMI} < 25.0 \text{ kg/m}^2$)使用前瞻性心电门控、低管电压(100 kV,管电流根据患者的 BMI 调整, $\text{BMI} < 22.5 \text{ kg/m}^2$ 为 160 mA, $\text{BMI} 22.5 \sim 25.0 \text{ kg/m}^2$ 为 190 mA)行 CCTA 检查,发现此方法在 $\text{BMI} < 25 \text{ kg/m}^2$ 的人群中辐射剂量达到了亚 mSv(平均 0.69 mSv)水平,低于常规方法的 35%,且两者图像质量相似。

Tatsugami 等使用一种新的降噪方法:多相位数据平均(automatic exposure control)和非刚性图像配准(non-rigid image registration, NRR):首先,准备 3 组常规容积数据,分别为 RR 间期的 70%、75%和 80%,使用 40% ASIR;第二步,采用非刚性配准将 70%和 80%校准至和 75%的图像一致。最后,通过 3 组的图像的加权平均产生一组去噪图像。与常规技术相比,此新技术联合 40% ASIR 能降低冠脉 CTA 图像噪声的 35%,可减少 58%的辐射。

Kobayashi 等使用 256 排、旋转速度为 0.27 s 的 CT(iCT、Phillips、Netherlands)联合使用心跳期相 NRR 和 IR 以降低冠脉 CTA 的图像噪声,在每个心动周期使用变形校准(deformable registration)来排列像素,并使用相位间滤波算法(interphase filtering algorithms, IFA)。结果表明 IR 和 NRR 技术都能减低噪声、提高图像质量。

Kroepil 等分析 IR 水平对低剂量心脏 CTA 图像质量的影响。在 256 排 CT 上扫描的前瞻性触发“步进”CCTA 数据使用 FBP 和 4 水平的高级 IR 技术(iDose⁴, Philips)重建产生 2、4、6、7 级的 IR 原始和图像数据。另外,不同的重建 kernel 值(半平滑, CB;标准, XCB)和“多分辨率”技术(MR)用于防止高水平 IR 的噪声。CCTA 的平均有效剂量为 $(1.7 \pm 0.7) \text{ mSv}$ 。平均 CNR 方面, IR 明显高于 FBP, IR 水平越高,图像质量越好。但 4 级 IR 的图像质量最好,与 FBP 相比仅有少量伪影。XCB kernel 比 CB kernel 的主观评分高, MR 进一步提高了高水平 IR 的图像质量。XCB kernel 和多分辨率技术在最小化伪影的同时,使得图像表现更加“经典”。因此中等水平的迭代重建联合边缘增强算法可明显提高低剂量 CCTA 的图像质量,建议常规用于临床。

Halpern 等在二代飞利浦 256 排 CT 上使用管电流调制(TCM)收缩期图像在 RR 间期的 40%采集图像,分别使用 FBP 法、一代 IR(iDose)和二代 IMR(Philips Medical Systems; Cleveland, OH)法重建。结果发现,与 FBP 相比,二代 IMR 能减低 88%血管内噪声,明显提高图像质量,辐射量低于目前 FBP 和 iDose 的 80%。

Fan 等在回顾性心电门控冠脉 CTA 使用快照冻结运动校正(snapshot freeze motion correction, SSF)算法,发现 SSF 能提高 CCTA 的图像质量和可解释性, 45% RR 间期的图像质量是最好的。Zhao 等比较不同强度 Sonogram-affirmed 迭代算法(SAIR)和 FBP 的图像质量和对 CCTA 上非钙化斑块的显示。发现与 FBP 相比, SAIR 提高了图像质量,改善了非钙化性斑块的显示,尤其是对高 BMI 的患者。而且, 18.3%的非钙化性斑块在 FBP 上未能显示,而在 SAIR 上显示出来了。在 SAIR 各级强度的图像中, 14f 的图像质量评分最好,对斑块轮廓的显示最清楚。

冠脉 CT 是否可以不用心电门控、不屏气扫描? Kim 等使用 128 层双源 CT 对 137 例患者行无心电门控、高螺距 CCTA 扫描,发现此方法是可行的,尤其是对于心率低的患者。与无心电门控标准螺距 CTA 相比,高螺距 CTA 对主动脉瓣和冠脉的成像质量很高,有效辐射剂量更低 $[(4.3 \pm 0.7) \text{ mSv vs } (5.4 \pm 1.2) \text{ mSv}]$ 。

Funama 等使用二代 320 排 CT(Aquilion ONE Vision, Toshiba)前瞻性心电门控、单次心跳内容积扫描,联合自动曝光控制(automatic exposure control, AEC)和 3D AIDR 对模拟人胸部模型进行 CCTA 扫描(120 kV 和 275 ms/r),证明此方法能明显减少辐射剂量而不损失图像质量。

2. 对比剂剂量的降低

低管电压下冠脉内对比剂的 CT 值会增高,基于这一点,许多学者尝试使用低管电压、低浓度对比剂来进行冠脉 CTA 成像,但得到的结果有一定争议。Dan 等研究发现,冠脉双源 CTA 使用 270 mg I/mL 碘对比剂、100 kVp 管电压方案对于正常 BMI 患者是可行的。此扫描方案在减少患者碘摄取的同时能提供优质的图像质量。使用 270 和 370 mg I/mL 碘对比剂在发现冠脉斑块方面的作用是等效的。而 Cai 等使用 320 排 CT 对 98 名患者行 CCTA 检查,发现要获得足够可信的冠脉评价图像,对比剂注射总量至少应为 $350 \text{ mg I/mL} \times 0.6 \text{ mL/kg}$,并在 8 s 内注射完成。Wu 等使用低浓度对比剂、双能谱 CT 进

行冠脉 CTA 扫描,发现双能谱 CCTA(70 keV 单能图像)比传统的 CCTA 能提供更好的图像质量并减少对对比剂使用。对于老年肾功能受损的患者而言是更好的选择。

Sasi 等采用快速转换 kVp 双能 CT、使用低剂量对比剂和标准对比剂量行 CCTA 扫描,前瞻性、单中心双盲研究 77 例患者,结果发现低剂量 CCTA 图像质量在 SNR、CNR 以及图像可解释性方面与标准方法相似,且可减少 50% 对比剂用量,可考虑用于存在 CIN 高危因素的患者。

Dan 等使用双源 CT、100 kVp 进行 CCTA 扫描,比较 3 种不同的对比剂(CM)注射方法:对比剂浓度分别为 370、320 和 270 mg I/mL,注射流率(IR)相同(5.0 mL/s, 14 s)。研究表明 270 mg I/mL 碘对比剂和 100 kVp 管电压的双源 CT 冠脉血管成像方案对于 BMI 在正常范围的患者是适用的,可减低碘剂量同时获取好的图像质量。

Zhao 等使用 320 排 CT 研究了 90 例心率 70 次/分、体重 80 kg 的患者,发现在成像第一个 4 s 使用半流速与 10 s 内单一流率相比,可以减少对比剂注射量的 20%,并可获得充分可靠的冠脉评价。流速变化的对比剂注射方法有益于获得充分可靠的冠脉评价,同时尽可能减少冠状静脉伪影。

不同扫描条件下冠脉内的 CT 值往往有差异,在如何消除这种差异,Kawaguchi 等尝试使用稀释的对比剂(CM)注射方案来统一冠脉内的 CT 值。作者采用回顾性心电门控,分别使用 4 种 CM 注射方法和管电压。A 组 120 kV, B 组 100 kV;血管增强值设定为 350 HU;时间-密度曲线使用稀释的对比剂测试扫描(20% 稀释的对比剂, 5 mL/s, 注射时间 10 s),正式扫描时对比剂优化浓度可用以下公式计算:

$$A\% = 20\% \times \frac{350 - \text{基础 CT 值}}{\text{测试扫描中的峰值强化} - \text{基础 CT 值}}$$

经预扫描得到注射稀释的对比剂的最优时间。C 组为体重调整的方法, 225 mg I/kg, 120 kV; D 组为 100 kV 175 mg I/kg。结果发现稀释对比剂注射方案可在不同的管电压下统一冠脉内增强 CT 值。

Jiang 等在 64 排 CT 上探讨了对比剂注射方案个体优化的问题。作者使用如下公式计算:

$$\text{注射流率 (mL/s)} = \text{EW} \times \text{W (kg)}$$

$$\text{注射体积 (mL)} = \text{IR} \times [t(s) + t'(s)]$$

W、t 和 t' 分别代表患者体重、扫描时间和预扫描时间。经过分析, 体重-流率指数 (weight-rate index, EW) 的最佳值为 0.07。

Zhang 等发现与常规方法相比, 使用 270 mg I/mL 对比剂和 80 kVp 管电压、50% ASiR 重建能减少 33% 的对比剂用量和 43% 的辐射剂量。Yin 等对 CCTA 的低管电压、低碘浓度对比剂和迭代算法对图像质量的影响和辐射剂量的减低进行了一项前瞻性、多中心研究。作者使用 100 kV、低碘浓度对比剂(270 mg I/mL)和基于原始数据的迭代算法(sinogram affirmed iterative reconstruction)。与常规 120 kVp、370 mg I/mL、FBP 算法相比, 前者能在保证图像质量的基础上, 减低对比剂用量(平均 27%)和辐射剂量。

Rengo 等探讨了 CCTA 扫描过程中碘浓度对血管 CT 值的影响。发现 CCTA 血管内 CT 值主要受碘递送流率(iodine delivery rate, IDR)影响, 不同浓度的对比剂, 如果以同样的 IDR

注射, 其血管内的 CT 值是相似的。低浓度的对比剂需要的注射压力值明显较低, 而且达到增强的时间明显缩短。

高速注射 CM 对患者是比较危险的。Yu 等探讨了不同的注射流率对图像质量的影响。作者分别使用了以下方案: A 组 BMI > 24, 120 kV, CM 65 mL; B 组 BMI = 24, 100 kV, CM 55 mL。每个组分为 6 个亚组, 给 370 或 350 mg I/mL 的对比剂, 流率为 4、5 或 6 mL/s。发现不同的注射流率对图像质量没有影响, 意味着我们可以尝试使用更低的注射流率, 例如 4 mL/s 行 CCTA。但此结论尚应在更大的样本中加以证实。

管电流也会影响碘对比剂的 CT 值, 但是在增强扫描中很少考虑这点。Wang 等探讨了在心血管 CTA 时根据管电压优化对比剂注射方案。作者使用修正的商业对比剂注射算法(P3T, Bayer Radiology), 采用前瞻性心电门控触发螺旋技术, 管电压为 100 或 120 kVp(根据患者的体型)。研究表明, P3T 算法 100 kV 比 120 kV 得到更高的血管 CT 值。模拟的结果表明依据管电压优化增强的方法能减少 30% 的对比剂用量。但此结果需要在活体实验中进一步证实。

Mitsouras 等比较两相和三相对比剂注射方法冠脉 CT 值差异, 发现两相注射法冠脉 CT 值的变异大于三相注射法, 但两者均能显示正常和异常冠脉。

3. 运动校正算法

对于心率较快的患者, CCTA 常常难以获得理想的图像, 新出现的运动校正算法在解决这个问题方面似乎很有潜力。

Zhao 等使用一种基于运动校正算法的新的非刚性配准(snap shot freeze, SSF)行 64 排冠脉 CTA, 发现与单 sector 和双 sector 重建法相比, SSF 能明显提高快速心律患者 CCTA 的图像质量。Li 对快速心率[65~75 bpm, 平均(69.7 ± 3.2 bpm)]的患者使用 SSF, 发现与双扇区重建法相比, SSF 算法的图像质量更好。Du 等使用回顾性心电门控、SSF 对 15 例心率较快的患者[67~85 bpm, (73.7 ± 5.5) bpm]进行 CCTA 成像, 发现 SSF 用于提高这类快速心率患者的 CCTA 图像质量是可行的。Carrascosa 等使用周期内 CT 运动校正算法(Intracycle CT Motion Correction Algorithm)SSF 在 128 层(GE Discovery CT750 HD)上对 20 例患者行 CCTA 扫描, 发现与传统 CCTA 相比, SSF 能更好地显示冠脉, 同时减少不可评估的节段。Lee 等发现使用新的定制的运动矫正(MC)算法, 提高了常规心率冠脉 CTA 的 RCA 和 LCx 的图像质量和整体的可解释性, 可用于提高单源 CT 时间分辨率不够的情况。

心率超过 65 bpm 的患者, 320 排 CT 使用多周期重建以提高有效时间分辨率, 但因为某些患者不能屏气, 心脏在每次心跳的运动形式不同, 这种情况下, 多周期重建就不能提高 CCTA 的时间分辨率。Wang 等使用半周期重建法(half-cycle reconstruction, HCR)对不能屏气、心率较快患者的 CCTA 数据进行重建, 发现 HCR 能提高自由呼吸、心率 > 65 bpm 患者的 CCTA 图像质量。Bernhard 等研究 40 例心率在 60 次/分及以下患者自由呼吸、采用第二代双源 CT 高螺距扫描模式行 CCTA 扫描, 发现图像质量可部分保存。此外, 由于更短的扫描延迟自由呼吸 CCTA 可减少对比剂的剂量。

4. 支架内再狭窄

支架内再狭窄(ISR)和支架的变形一直是临床非常关注的问题。一些学者对这两个问题进行了探讨。

Ling 等联合 CT 灌注(CTP)以及 CCTA 对支架内再狭窄进行诊断,发现双源 CT 诊断支架内狭窄的敏感度 75%,特异度为 100%,符合率为 94.3%;诊断非支架内狭窄的敏感度 87.5%,特异度 100%,符合率为 93.3%。若 CCTA 结合 CTP 符合率可达 100%。CCTA 结合 CTP 可用于对冠脉支架植入的患者进行随访。Wan 等使用 320 排 CCTA 诊断支架内再狭窄,以冠脉造影为金标准,CCTA 探测支架内再狭窄的敏感度、特异度、阳性和阴性预测值分别为 92%、96%、96%、66% 和 99%。有支架内再狭窄的患者支架数量明显高于无支架内狭窄者,支架内狭窄右冠发生率为 12.7% (14/96),左旋支 10% (5/45),前降支 3.8% (6/149)。320 排 CTA 诊断支架内狭窄的敏感度、特异度、符合率均很高(92%~96%),但阳性预测值在支架水平为 66%,患者水平为 77%。因此认为 320 排 CTA 对诊断 ISR 很重要,尤其是阴性预测值高达 99%。Yang 等使用低剂量高螺距双源 CTA 和迭代重建算法诊断支架内狭窄,发现低剂量高螺距双源 CTA 可以很好的检测支架内的通畅程度。迭代算法明显提高了对小支架内再狭窄的诊断准确性。

Li 等探讨了 CT 值倒置征(reverse attenuation gradient sign,RAG)(定义为阻塞远端血管腔内 CT 值倒置,近端 CT 值较低、沿血管呈梯度增加)在鉴别支架内完全狭窄(TOs)和部分狭窄(SOs)的作用。发现 RAG 征代表了阻塞病变远端颠倒的侧支灌注,对 TOs 高度特异,有助于鉴别 TOs 和 SOs。

Chung 等探讨了冠脉支架机械变形的形态学预测和临床意义。回顾性分析 584 例患者共 864 处冠脉狭窄。支架变形的表现:部分或完全折断、纵向压缩(LC,纵轴方向的扭曲或缩短)、径向压缩(RC,径向轴支架局部直径减小)、支架内再狭窄(支架截面狭窄 $>50\%$)、动脉瘤。结果发现心脏 CT 能有效评估冠脉支架的机械变形。过度扭曲和开口处支架分别是支架断裂和 LC 的独立预测因子。ISR 和动脉瘤的存在与支架断裂具有高度相关性。

5. 冠脉血流及功能储备的评估

Federica 等在稳定性胸痛人群中发现,动态双源 CT 按绝对值估算的局部充血性心肌血流(MBF)随着 MRI 的灌注储备指数(PRI)的减少而明显减少。MBF 是一个定量参数,可避免使用静息灌注成像,其临床应用更广泛,扫描时间以及费用更少。CT 检出的冠脉狭窄与心肌缺血的相关性很小。Corrected contrast opacification (CCO)是一种基于冠脉 CTA 数据的新技术,可用于评估狭窄对冠脉血流的影响,CCO 通过冠脉 CT 值除以相同水平的降主动脉的 CT 值得到。Dekker 等对 60 例无心脏症状的患者行 CCTA 扫描,计算 CCO 值,发现与腺苷灌注 MRI(APMRI)相比,CT 发现的冠脉狭窄的 CCO 减低和 APMRI 上的缺血高度相关。因此 CCO 是一种有前途的非侵入性地评估 CT 发现的冠脉狭窄的功能和意义的方法。

Okada 等对 69 例患者在舌下含服硝酸甘油前后分别行冠脉 CTA 扫描,计算冠脉扩张率(VR)。结果发现冠脉斑块会降低冠脉的扩张性,无论斑块是何种类型,冠脉斑块本身可能引起冠脉扩张功能的丧失(即便是使用硝酸甘油后)。尤其是环形钙化斑块可明显降低冠脉的顺应性。Dey 等使用 CCTA 定量测量不良斑块的特点以预测损伤的心肌血流储备(myocardial flow reserve,MFR),使用 $^{13}\text{N-NH}_3$ PET 作为金标准。CT 计算动脉非钙化(NCP)、低密度 NCP 和全部斑块,以及最大狭

窄直径、最大重构指数、对比剂通过病灶时最大密度。发现定量分析不良斑块的特点能明显提高对 MFR 损伤和缺血的预测准确性。

So 等对正常猪使用射线硬化校正(beam hardening correction)在快速 kV 切换双能 CT 上定量测量心肌 CT 灌注,扫描参数:140 kV/80 kV,变换间隔 0.2 ms,640 mA,0.35 s/r。发现与金标准微球心肌灌注成像相比,此技术能最小化线束硬化,更准确地测量心肌灌注,对评价缺血性心脏病是非常可靠的。Sung 等对 71 例冠心病患者的研究发现,与静息双能 CT 相比,负荷双能 CT 对于发现心肌灌注缺损有更好的性能,结合 CCTA 检测血流动力学明显狭窄效果更佳。Jacob 等回顾性研究 53 例患者,发现收缩期 CCTA 心肌成像与舒张期成像相比可能对于发现灌注缺损更敏感。尽管核素成像发现的大多数心肌灌注缺损在 CCTA 普通心脏分析时也可发现,但这个技术在临床上可能不适用,因为 CCTA 灌注缺损的假阳性率太高。Patricia 等研究了 40 例已知或怀疑冠心病的患者,发现用相似辐射剂量,负荷-静息双能 CT(DECT)心肌灌注比单能 CT (SECT)与 SPECT 检测的心肌灌注缺损的相关性更高。Ullrich 等发现 3D 半自动化测量软件评价动态 CT 心肌灌注成像的心肌血流速度(MBF)/心肌血流容积(MBV)值与手动评价高度吻合,与 SPECT 有很好的一致性。用这个软件可减少后处理和时间。

Mehra 进行的国际多中心实验发现,对于心肌缺血,CT 灌注(CTP)成像与 SPECT 不一致的患者,CTP 图像比 SPECT 图像对于检测解剖学冠脉狭窄更敏感。大多数阳性的 CTP 发现没有相应的 SPECT 灌注缺损,但实际上的确存在单个或多个血管或左主干冠脉的病变。因此认为 CT 灌注成像较 SPECT 灌注成像在预测侵入性冠脉造影(ICA)显示的冠脉明显狭窄方面更准确。CT 评价心肌延迟强化(DE)是可行的,但是因为相对较低的对比噪声比(CNR)以及半扫描重建产生的伪影仍未被广泛应用。定向空间频率过滤法(TSFF)可以获得高时间分辨率以及改善心肌 CT 值的稳定性。Kurobe 等发现 TSFF 算法可有效减少心肌 CT DE 图像的伪影,明显改善观察者间对于心梗区域测量的可重复性,可用作 CAD 和心肌梗死的全面评价。

CTCA 是一种解剖学成像方式,但往往不适用于预测功能性冠脉明显狭窄。Alexia 等在稳定性心绞痛的患者中,发现 MBF 比 CTCA 和半自动化定量(QCT)在判断功能性明显冠脉病变上更有优势,MBF 对于中度冠脉病变有超过 CT 解剖学诊断之外的价值。Sung 等对 100 例无冠心病病史以及慢性心梗的患者行双源 CT 负荷灌注成像(SP-DECT)、负荷 MR 灌注成像(SP-CMR)以及 CCA。以 SP-CMR 为参考标准,SP-DECT 可以提高 CCTA 诊断血流动力学明显狭窄的准确性,可成为灌注成像技术如 SP-CMR 和 SPECT 的替代选择。

6. 其它临床应用及新技术

Pontone 等比较高清晰冠脉 CTA(HDCTCA)(Discovery CT 750 HD scanner,GE)和标清 64 层 CT(SDCTAC)对冠脉疾病的诊断准确性。HDCTCA 空间分辨率高达 $230\mu\text{m}$ 。与 SDCT-CA 相比,它对钙化段冠脉病变检查的可重复性、阳性预测值和准确性均有提高,因为更高的空间分辨率及其引起的模糊效应的减少。HDCTCA 为显示解决重度钙化冠脉的成像提供了一种选择,几乎减少了一半对钙化体积的过高估计。

CT 评价心肌纤维扩散来评价细胞外容积是一个新的方法。Kurita 等回顾性分析 27 例没有冠脉狭窄的志愿者,发现该研究中 CT 细胞外部分的值与之前 MRI 报道具有良好的一致性。细胞外容积和年龄具有强线性相关性,可能暗示 CT 纤维扩散增加与正常年龄增长相关。在评价心肌纤维扩散时,应考虑年龄以及左室心肌细胞外部分的局部差异。

以年龄和性别为基础的冠脉 CTA 非侵入性分相流动储备计算:前瞻性多中心研究血流储备分数(FFR)在侵入性冠脉造影中是评价局部缺血的金标准。从非侵入性静息冠脉 CTA 获得的 FFR(FFRCT)可测量局部特异性缺血,与侵入性 FFR 具有高度一致性。

Sung 等进行前瞻性多中心非盲研究,发现与延迟增强 MRI(DE-MRI)相比,延迟增强 CT(DE-CT)对发现 2 型糖尿病患者隐匿性心肌梗死(occult myocardial scars,OMS)的敏感度中等,但是特异度很高(患者水平敏感度 58.3%,特异度 100%;节段水平敏感度 50%,特异度 100%)。

Patricia 等对 25 例患者行非增强钙化积分以及增强双能冠脉 CTA 扫描。研究表明冠脉钙化积分软件测量的钙化积分与对比增强 DE-CCTA 行 3D 定量分析得到的钙化积分之间存在良好的线性关系。因此,预后以及诊断信息可以通过一次扫描获得,减少总的辐射剂量以及费用。Hiroyuki 等对 166 例怀疑冠心病的患者随访平均 103 个月,发现非阻塞性冠脉中非钙化斑块或混合斑块合并两个易碎斑块是在预测主要心脏病事件的危险因素。Radwa 等前瞻性研究 129 例无症状成年人,表明 CTA(MDCTA)可有效发现无症状的具有低至中度 CAD 风险患者的冠脉斑块,与危险因素结合,可准确预测特异性人群的动脉粥样硬化风险。Azien 等研究发现专用半自动化斑块分析软件分析冠脉粥样硬化斑块特征具有可重复性,但当观察者以个人经验校正斑块分段后观察者间差异(IOV)明显增加。为保持斑块分析的可重复性,放射科医师必须详细了解的冠脉斑块分析的标准概念。

Andreini 等对 21 例冠脉搭桥(CABG)患者进行 73 个月的随访,发现多排 CCTA 对 CABG 患者长期风险分期很有前景,尤其是对于未保护的冠脉区域(unprotected coronary territory,UCTs),比冠脉保护积分更有预测价值。Koo 等分析 716 例肝移植患者的临床资料,发现肝移植患者的 CAD 风险与一般人群相比并未明显增加。肝移植前常规术前心脏 CT 可能是不必要的。

使用吸收对比 CT(ACT)进行动脉粥样硬化斑块成像是有限的,因为诸如软斑块等低吸收物质的对比度很差。相位对比 CT(PCT)是一种实验性技术,基于 X 线相位切换(phase-shift)而非吸收,在生物软组织中产生更高的对比度。相位对比亨氏单位(HU-P)能够使用折射指数通过吸收对比 HU 来计算。Hetterich 等对离体人类冠脉使用常规管电压 35 kV 和光栅干涉仪同时获得相位-和吸收信号。断层图像使用有效像素尺寸为 100 μm ,发现基于定量 HU-P PCT 能可靠地区分动脉粥样硬化内的重要组成成分(纤维、富含脂肪组织和钙化组织),表明其对 CAD 的巨大的应用前景。相位对比 CT(PCT)还有高分辨力、不破坏组织学特性且有高度的软组织对比等特点。早期证据表明动脉粥样硬化斑块成分,例如纤维和富含脂质组织可以被显示。Schlett 等使用全自动计算算法 MATLAB

(Mathworks,Natick,MA)探测餐巾环征(NRS),NRS 被证实是一种 CCTA 上易损斑块的高度特异性的标志,特点为中央是低密度的富含脂肪的或坏死核心,周围是环形更高 CT 值的纤维组织。这种新算法在 CCTA 横轴面图像上诊断 NRS 上具有良好的准确性。Laqmani 等发现半自动斑块分析软件在探测冠脉斑块方面有非常高的假阳性率(72%),无假阴性。导致假阳性的原因包括冠脉周围脂肪内的高密度、血管分叉、邻近的静脉显影、动脉扭曲。因此,使用半自动斑块分析软件探测冠脉斑块是不可靠的。Dharampal 等回顾性分析 2042 例症状稳定的患者的资料,发现同时行临床评估(包括典型的胸痛、女性、年龄、危险因素和 ECG)和 CT 平扫得到钙化积分评估能使 44%的患者免于不必要的 CCTA 检查。因此,可用联合评估临床和钙化积分来改善稳定型心绞痛的患者的风险分级。

房颤(AF)可能发生血栓栓塞性中风。90%的栓子来源于左心耳(LAA)。如果与 LAA 孔径不对可能导致要使用多个封堵器,或导致 LAA 封堵不完全。Goitein 等使用 256 排 CT、回顾性心电门控心脏 CT 来测量所需的左房心耳封堵器大小,发现 CCCT 测量的直径和封堵器尺寸有良好相关性,但 LAA 最大直径>30 mm 者预测结果不准确,其中 80%的患者封堵失败或不完全。Kim 等对 102 例患者使用双源 CT 定量测量房颤和三尖瓣狭窄患者的三尖瓣面积(mitral valve area,MVA),发现双源 CT 测量的 MVA 明显大于经胸壁超声测量的结果。但是对于声窗不佳的 AF 患者及经胸心脏心动图结果很不确定时,双源 CT 仍不失为一种选择。透视电影是评估人工心脏瓣膜(PHV)瓣叶运动的金标准。MDCT 能精确的测量非受限和受限的人工瓣膜关闭角度(leaflet closure angles),与透视电影一样都能准确地探测瓣叶关闭不全,二者最大的差异为 3°。

Geyer 等发现血清学标记物 MMP-8 水平的提高和动脉粥样硬化斑块 CCTA 测量的体积关系较大。另外,血清学标记物 IL-8 和 TNF 可能提示心肌重构活跃、CT 上心肌质量较高。集成的心脏 CT 定量测量和新的动脉粥样硬化血清学标记以及心肌重构的关系可加深对冠心病病理机制的理解。

冠脉钙化逐渐成为心血管风险分层的一项重要生物学标志。新的指南推荐使用心脏 CT 对无症状的低-中等和中等心血管风险的成年人来评估钙化,Willeminck 等分别使用 4 个不同的供应商的软件对 14 个人类离体心脏标本计算冠脉钙化积分,发现相同的扫描条件下,不同厂家的 CT 对同一标本得到的 Agatston 评分、钙化积分、心肌质量评分明显不同。

Sung 等回顾性分析 207 例有支气管扩张患者的冠脉-支气管动脉瘘(coronary to bronchial artery fistula,CBF)的发生率。发现 14 例 CBF (6.8%)合并支气管扩张。CBF 的交通动脉平均直径为 1.9 mm(1.0~2.9 mm)。CBF 更常见于中度和重度支气管扩张。心电门控心脏 CT 对于探测 CBF 非常有用,提供了支气管扩张患者瘘的解剖细节。CBF 的发生率明显和支扩的范围和支气管动脉充血的程度有关,是胸痛或咳血潜在的原因。

Sun 等对 50 例怀疑冠心病的患者使用 CCTA 仿真血管内镜(virtual intravascular endoscopy,VIE)显示冠脉斑块腔内表现、左冠脉分叉角与斑块形成的关系,发现动脉粥样硬化改变与左冠脉分叉角有明显的关系,宽的分叉角形成冠脉斑块的风险很高。

Ziadi 等对 133 名功能测试(^{99m}Tc -SPECT、踏车运动试验或负荷试验)后患者行 CCTA 扫描,发现功能测试阴性者可能存在梗阻性 CAD,缺血性心电图的患者在 CCTA 也可能上无冠脉狭窄,大多数功能测试结果不确定的患者中均无血流动力学明显改变的 CAD。CCTA 得到高的阴性预测值,尤其是在中度风险的患者和先前检查结果不确定者,对先前功能测试假阴性的患者也有重要意义。Gramer 等在 256 CT 上评估冠脉搭桥(coronary artery bypass graft, CABG)后患者心率、心率变异(heart rate variability, HRV)、z 轴位置对图像质量的影响,发现使用 270 ms 旋转时间的 256 排 CT 和前瞻性心电门控 GABG 成像,能显示 96.6% 的供血血管,观察者之间的一致性良好。移植血管的显示不受心率水平影响。但是高度心率变异 HRV 患者的图像质量明显下降,移植血管远端亦显示不清。Lee 等对 465 例患者 239 天的中位随访时间中,发现对于缺血性卒中患者,CCTA 发现的复杂主动脉斑块(CT 的参数包括斑块厚度、斑块复杂性等)和卒中复发的风险增高有关。另外,CT 上主动脉斑块的参数比 TEE 参数更具预测价值。CCT 可以用于明确心源性血栓栓子的来源,并能评估复发性卒中的风险。

Apfaltrer 等对 334 例乳腺癌放疗后的患者行 CT 检查,发现在 CT 图像上,乳腺癌患者在放疗后的冠脉钙化似乎并未增多。其初步的结果不支持放疗引起 CAD 加速,作为该组患者高比率心脏疾患的原因。然而,不理想的 CT 技术来评估冠脉钙化积分 CCS,患者人群不够均有可能影响结果。乳腺癌放疗后心脏疾病高发的进一步研究应该包括其它可能的潜在原因。

Fuchs 等研究认为,使用 2 代 320 排 CCTA 进行钙化图像减影是可行的,减影图像能提高阅片者的信心和对有钙化斑块和支架的冠心病的诊断准确性,因此可能提高 CCTA 的总体诊断效能(overall diagnostic strength)。

Kim 等探讨了 CCTA 上钙化积分(CAC)和冠心病与糖尿病视网膜病变(DR)的存在和程度的关系,发现冠脉钙化积分 CAC、斑块负荷、在糖尿病视网膜病变患者的发生率明显较高,增殖性糖尿病视网膜病变的患者明显的冠脉狭窄更加常见。增殖性的 DR 患者需要行 CCTA 了解冠脉情况。

Marie-Michele 等研究连续 41 例患者,发现心脏 CT 可有效的非侵入性描绘心脏静脉系统分流,适合于心脏再同步化治疗前评估。对于描绘静脉系统心脏 CT 比逆行静脉造影具有更高的敏感性。Daniel 等发现经胸壁超声(TTE)测量的左房容积估与门控多排 CT 相比普遍减低,可能与图像空间分辨率较少以及 TTE 的透视缩短有关。解剖学标志(包括精确的左房壁和二尖瓣位置)在多排 CT 上更容易呈现。

Koya 等分析 56 名右心导管介入(RHC)证实肺动脉高压患者,发现 ECG 门控 320 排 CT 发现肺动脉高压的患者右室心肌纤维化在短期预后不良,尽管有心肌纤维化和无心肌纤维化的患者 CT、TTE 和 RHC 血流动力学参数没有明显差异(除无心输出量)。对比血流动力学参数,右室出现心肌纤维化是永久的形态学参数,对于准确预测肺动脉高压患者的预后有帮助。

非侵入性心脏 CT 和延迟强化(DE)MRI 可评价心脏的解剖以及心肌基质。身体体表标测(BSM)可非侵入性评价心脏活性。Hubert 等研究 24 例室性心动过速的患者,发现结合解剖学、基质以及电兴奋信息,BSM 与成像相融合可全面地非侵

人性评价心脏电活动异常。可应用于诊断、判断预后以及消融定位。身体体表标测可与其它非侵入性心脏成像方式相融合可对心律失常进行全面的评价。心肌疤痕形成在延迟心脏 CT(dCCT)上可表现为明显强化。但 64 排 dCCT 由于时间分辨率较低,可能依赖于心率,故评价强化形式的最佳期相仍不确定。James 等研究 50 例既往有心肌梗(MI)的患者,发现选择心脏期相评价 dCCT 心肌梗死在临床上相对不重要,心率似乎是更占主导性的因素。延迟强化在心脏的舒张末期显示最准确。

Hyun 等分析 86 例感染性心内膜炎患者的资料,发现在显示一些特别的病变时,如脓肿/假性动脉瘤、人工瓣膜受累等,心脏 CT 较经食管超声心动图(TEE)更有价值。术前 CT 能有效显示 IE 的细节,为手术计划的制订提供更多有价值的信息,并能检测合并的冠脉疾病。

再次心脏手术的死亡率和患病率风险增加与术中损伤相关。恰当的术前成像是必要的,传统 CT 可清晰显示解剖学细节,但功能评价受限。Harish 等研究 18 例需再次行心脏手术的患者。最初经验显示呼吸动态 4D CT 评价再次胸骨切开术患者的功能,可提高术前成像准确性、改善危险分层以及手术策略,因此减少患者的再次手术风险。

心脏 MRI

法洛氏四联症(TOF)修补术后的患者易于发现右室扩张以及功能不全,从而导致长期的并发症。MRI 是测量右室(RV)容积的金标准,但右室分析时应用横轴位还是短轴位(SA)仍具有争议。Juliane 等回顾性研究 27 例 TOF 术后患者,发现磁共振横轴位与短轴位测量的右室容积相似,不存在系统性误差。由于磁共振右室 EDV 与超声右室舒张末期径线测量具有良好相关性,因此可推荐作为临床常规随访工具。

依照 FDA 的建议,钆对比剂用量正比于体重。然而,身体内的脂肪血管较少,相对于内脏器官或肌肉,对血管外液体空间的贡献较低。Liu 等对 1231 例无临床心血管病变者使用钆对比剂(Magnevist, 0.15 mmol/kg),增强前后使用 MOLLI 序列 T_1 mapping 扫描,发现在评估心肌 T_1 时,增强后 T_1 时间明显与 BMI 相关,在高 BMI 的个体,基于标准体重的钆对比剂注射方案“使用过量”,此效应在女性较男性稍明显。

Jerome 等研究 24 例 AMI 患者(STEMI)和 24 例健康志愿者,发现 T_1 和 T_2 mapping 可有效定量急性心肌梗死患者的心肌水肿。Charlotte 等随机选择 248 例高度敏感性测量(hs-cTnI)增高的 70 岁志愿者,5 年后再次行 LE-MRI 检查。研究发现 hs-cTnI 可预测 70 岁社区老人 5 年内未被 MRI 发现的心肌梗死。未被 MRI 发现的心肌梗死是否是真的心肌梗死尚有争议,而这个结果可能有利于解释这些未被 MRI 发现的心肌梗死的构造以及对预后的影响。

Philipp 等研究包括 20 例致心律失常性右室心肌病(ARVC)的患者、30 例 ARVC 边缘的患者以及 22 例有阳性家族史但没有 ARVC 临床表现的患者以及 10 例健康志愿者(HV)。发现 CMRI 使用应变分析的特征追踪(FT)可客观有效地定量测量 ARVC 室壁运动异常。尽管射血分数在正常水平,它仍可区分存在 ARVC 或边缘 ARVC 以及健康志愿者。修订的 2010 年标准方案表明,定量参数在 ARVC 的诊断中具有重要意义,基于 CMRI 的应力测量有望成为客观有力的诊

断工具。

Clinton 等回顾性研究行左室修补的患者,发现心肌截断征对于左室假性动脉瘤(LV PSA)具有较高的敏感性和特异性。由于 LV PSA 是紧急手术适应证且难以与真性左室动脉瘤(LVA)相鉴别,故做出这一诊断十分重要。

Guo 等使用心脏 MRI(CMRI)分析成年人部分肺静脉异位回流(PAPVR)的特点及其与静脉窦型房间隔缺损(SV-ASD)的关系,发现右上叶是 APVR 最常见的位置。PAPVR 累及右上叶和右中叶和静脉窦型房间隔缺损相关性最大。PAPVR 流入上腔静脉的高度和心房-腔静脉连接的关系在有静脉窦型房间隔缺损的患者明显低于无静脉窦型房间隔缺损的患者。注入高度 <30 mm 是存在并发的静脉窦型房间隔缺损的指征。

法布里病是不同器官鞘磷脂进行性沉积。¹H-MRS 能够非侵入性地测量心肌内的脂肪含量。Petritsch 等对 14 例基因检查证实的法布里病患者使用 3T MR 机(Magnetom TRIO, Siemens)分别行单体素波谱压水和不压水扫描。体素置于室间隔,使用 4 腔心和短轴位扫描,在收缩末期采集数据以避免信号被心外膜脂肪污染。测量 2 个甘油三酯峰(亚甲基群位于 1.3 ppm,甲基组 0.9 ppm),组织水为 4.7 ppm。心肌脂肪成分表示为甘油三酯-水的比率(%)。发现患者平均甘油三酯-水比率为 1.7% (0.1%~6.2%),明显高于正常对照组的 0.49% (0.1%~1.9%)。另外法布里病患者左室质量 $[(142\pm 44)$ g]高于正常组 $[(120\pm 36)$ g]。两组之间平均射血分数相似。

Gai 等使用 MOLLI T_1 mapping 序列、5 mmol/kg 钆喷酸葡胺,在增强后 12 和 25 min 测量心肌的 T_1 、部分系数(partition coefficient)、细胞外间隙(extracellular volume, ECV),发现相对于衍生值,如部分系数、ECV 等,控制剂量和时间的增强后得到的 T_1 值在区别心衰患者 HF 健康组织和纤维组织方面准确性和敏感性最高。

Saeed 等对猪心梗模型行 MRI 电影和延迟增强扫描,发现 MRI 能够显示微栓子在左室功能/重构方面的有害效应。冠脉微血管的机械栓塞损伤梗死再吸收(康复),损害左室功能、导致代偿性的肥大增加。MRI 的研究结果间接证实了最近的假说:微血管阻塞限制了梗死康复需要的细胞成分的递送和转运,在冠脉介入中急需发展一种新的能够捕获微栓子的远端过滤装置。

非增强的 T_1 MRI 能否鉴定慢性心肌梗死? Sun 等在 Siemens 3T Trio system 上使用一种新的 T_1 序列,发现正常心肌和梗死组织的 T_1 值分别为 (46.3 ± 4.1) 和 (87.3 ± 8.9) ms。 T_1 mapping 图上的梗死区域和延迟强化(LGE)测量的结果高度一致。这是首次使用非增强 T_1 成像来评估心肌梗死。尽管仍需要更进一步证实。此方法可能提供一种诊断慢性心梗的新方法,尤其是对肾功能不全的患者。

Ligabue 等对 140 例肥厚型心肌病(HCM)患者在 1.5T MR 行延迟增强扫描[注射钆对比剂(0.2 mmol/kg)15 min 后扫描 LGE]。发现 LGE%[指数化的左室舒张末期质量的百分比(Indexed end-diastolic left ventricular, IEDLV)]是非持续性室性心动过速(non-sustain ventricular tachyarrhythmia, NSVT)和持续性室性心动过速(SVT)的唯一相关因素,LGE%大于 8% 发生 NSVT 的风险非常高,其敏感度和特异度分别为 82% 和 67%。而对于 SVT,LGE%的拐点为 8%,其敏感度和特异度

分别为 92%、62%。LGE-CMR 上纤维化的范围能够预测 HCM 患者 NSVT 和 SVT 的发生。HCM 患者心肌纤维化很常见,被认为会导致心源性猝死和心衰。CMR 上延迟强化(DE)被用于评估心肌的纤维化,然而 DE 和组织学关系的证据尚有限。Corona-Villalobos 等比较 CMR 上所见与外科室间隔心肌部分切除标本,标本活检表明 HCM 患者伴有室间隔延迟强化趋向于有更广泛的纤维化,支持 HCM 患者的延迟增强代表心肌瘢痕的假说。目前应用最广泛的来探测心肌 LGE 的是反转恢复序列。最近,相位敏感反转恢复(PSIR)被发展来用于探测 LGE。Kido 等比较两种方法,发现两者的图像质量评分无明显差异。PSIR 能提高部分 IR 图像质量较差者,两者测量的 LGE 体积高度相关。PSIR 序列在评估左室心肌瘢痕方面很有发展前景。

MRI 上的心房延迟增强(Atrial delayed enhancement, aDE)被报道常见于房颤(AF)患者。Cochet 等对 190 例患者的 CMR 图像分析发现,除了年龄之外,AF 及其持续性是决定 aDE 范围的主要因素。然而,aDE 同样与女性、结构性心脏病(SHD)相关。aDE 的分布高度变异,但是有一固定的模式,不管潜在的条件如何。aDE 多见于后壁、左下肺静脉开口周围。MRI 上的心房延迟增强是由心房重构造成的。年龄、房颤、结构性心脏病与较大范围的强化有关。

Scharf 等分析未经训练者经 4 个月高强度跑步训练(high intensity training, HIT)后的心肌适应性改变,发现 HIT 人群的容积指数和左、右室心肌质量明显增大。这些特点和心源性猝死倾向的病理学特点无关。

Aandal 等使用在 1.5T MRI 上使用 GRAPPA 进行无门控、自由呼吸心脏成像,定性和定量评估左室功能,与金标准屏气电影相比,两种方法对 EF、EDV、ESV 的测量无明显差异。且自由呼吸扫描在观察心内膜边界时更加清楚,因为该方法减少了运动伪影,但屏气法在观察瓣膜、血池对比方面更好。Kalisz 等使用 1.5T 心脏 MRI (Magnetom Avanto or Aera, Siemens)在亮血电影 SSFP 图像上使用变形区域分析评估左室应力。与斑点追踪超声心动图(speckle tracking echocardiography, STE)相比,发现此方法是可行的,CMR 计算的峰值径向和切线应力(radial and circumferential strain)与 STE 的相关系数分别为 0.36 和 0.63。2D 相位对比(PC)MRI 是一项分析血管血流动力学的成熟技术。最近发展的实时 MRI 技术(Blood Flow from Real-time Phase-contrast MRI)可以不屏气、不使用心电图同步采集。然而,与常规方法相比,该方法的定量评估很复杂,Huellebrand 等使用软件进行自动定量分析,发现手动和自动定量测量有良好的一致性。因为无需手动校正,故该方法适用于在多个心动期内自动分析流速、峰值流速、每搏输出量、流量随时间的变化率等。

Zhang 等对 28 名健康志愿者采用改良的 Look-Locker 反转恢复序列(modified Look-Locker inversion recovery, MOLLI)、静脉团注 Gd-DTPA(0.15 mmol/kg)来测量心肌的 T_1 值,发现室间隔部及左室的前壁、外侧壁、下壁的平均 ECV。健康人群中女性的心肌 ECV 高于男性。该结论可能对临床和科研中涉及心肌 ECV 时的研究分析有所帮助。Reiter 等在 1.5T MR 上使用 MOLLI 序列评估收缩期和舒张期心肌 T_1 的差异,并评估心肌 T_1 值的变异和血液 T_1 时间的关系,发现正常心肌

的舒张期和收缩期 T_1 时间明显不同 $[(984 \pm 28) \text{ ms}$ 舒张期, $(959 \pm 21) \text{ ms}$ 收缩期], 但是二者明显相关。排除性别差异后, 血液标准化(Blood Normalization)能减少心肌 T_1 时间的变异, 可改善受收缩和舒张影响的鉴别正常和病理的 T_1 诊断阈值。

Reiter 等比较 4DMR 流速 Mapping 三种不同的显示方法对肺动脉压增高的显示: 矢量(Vector), 流线(Streamline) 和粒子轨迹可视化(Particle Trace Flow Visualization), 3D 矢量可视化图像对血液涡流的期相的判断与平均肺动脉压(mPAP)相关性最好, 流线和粒子轨迹可视化也有相似的结果。4D 流速 mapping 作为一种评价肺动脉血流动力学的新工具, 能评估 mPAP 的升高。

Noureldin 等在 3T 上使用 ^1H -MRS 测量心肌脂肪变性和全身脂肪储藏的关系, MRS 使用心电门控和 PRESS 呼吸导航技术。PRESS 体素定位于 SSFP 四腔心层面等容舒张期的室间隔, 使用饱和带经过皮下和心包下脂肪。同样的序列行骨关节扫描, PRESS 体素定位于股外侧肌、胫前和腓肠肌。分析发现在有心脏疾病的人群中, 心肌脂肪变性与高甘油三酯水平及骨关节系统脂肪沉积有关。

二叶主动脉瓣(BAV)是一种常见畸形, 与升主动脉(AsAo)扩张有关。Burris 等分析 23 例 BAV 患者的 4D 相位对比 MRI 图像发现, BAV 患者收缩早期血流移位(Flow Displacement)预示着升主动脉扩张, 可能是 BAV 患者风险分级的一种简单易行的方法。

Kim 等对 34 例重度主动脉狭窄(aortic stenosis, AS)患者分析有无心肌纤维化(MF)对心功能和瓣膜特点的影响。发现 MF 患者的中度主动脉返流多于无 MF 的患者。有 MF 的患者主动脉瓣钙化体积评分更高, CT 钙化分级更高, 有更严重的 AS, 更高的峰值流速和平均压力梯度, 更高的左室质量指数, 更低的左室射血分数, 和更大的左室舒张末期体积。MF 见于严重的 AS, 与临床远期预后相关。CMR 延迟增强能发现 MF, 早期使用 CMR 探测 MF 能增加早期手术治疗严重 AS 的机会。

MitraClip System 是一种新的经皮介入修复三尖瓣的方法。Krumm 等使用 MRI SSFP 电影评价 MitraClip 术后评价心脏的反向重构(Reverse Remodeling), 发现 MitraClip 术后 LA 和 LV 的扩张明显减低(文献中认为是心脏反向重建的标志), 对心脏的形态学和功能方面有正性效果, 能引导反向重建。

Secchi 等采用 1.5T 心脏 MRS 作为鉴别运动员和早期肥厚性心肌病(HCM)的诊断方法。先仰卧位扫描 ^1H -MRS PRESS, 单体素置于室间隔; 再俯卧位扫描 ^{31}P -MRS, 采用多体素化学位移成像序列(multivoxel chemical shift imaging sequence)。发现早期 HCM 患者 PCR/GATP 比值降低, Pi 浓度增高。而运动员的心脏无能量代谢改变。HCM 患者心肌脂肪明显增加。

使用射频消融(RF)进行肺静脉电隔离术(PVI)逐渐成为治疗阵发性房颤(AF)的合理方法。PVI 对心脏重构的短期和远期的影响仍是未知的。Foppa 等使用 Look-Locker 序列在 PVI 术前、术后测量室间隔的 T_1 来检测左室弥漫性纤维化。 T_1 测量值通过年龄、体重、对比剂剂量、eFGR 和注射后的时间来校正。结果发现术前有严重的左室心肌纤维化者, 可能影响 PVI 术后心脏重构的程度。Allen 等使用 4D 流动 MRI 研究肥厚型心肌病(HCM)患者的左室流出道(LVOT)压力梯度和升

主动脉(AAo)的 3D 血流横式。血流可视化和定量测量使用专门的软件(EnSight、CEI、Apex、NC), 结果发现 4D 流动 MRI 可对流出道血流动力学做出综合评估, 有助于诊断 HCM 和左室流出道梗阻, 为诊断 HCM 血流动力学紊乱提供了一种新视角。

电解剖标测(electroanatomic mapping, EAM)引导的导管消融是反复的室性心动过速(VT)患者和非缺血性心肌病患者的有效治疗手段。但 EAM 很难鉴别心肌炎后瘢痕和缺血后瘢痕(前者会引起室性心动过速)。延迟增强扫描能很准确的鉴别两种心肌疤痕。Palmisano 等对 19 例心肌炎后室性心动过速患者行 CMR 扫描, 注射钆后 10~15 min 行 IR T_1 WI。发现在消融前行 CMR 的延迟增强图像能增加发现心肌炎后瘢痕的概率, 从而增加射频消融的成功率。心尖性肥厚型心肌病(ApHCM)是 HCM 的一个亚型, 预后相对较好。Hanneman 等发现延迟增强(LGE)占左室总心肌质量的百分比(%LGE)是不良预后的一种独立预测指标, 有临床后果患者的 %LGE 明显高于无临床后果者 $[(15.96 \pm 11.88)\% \text{ vs } (10.16 \pm 7.3)\%, P=0.011]$ 。女性、有呼吸急促史的患者更容易有不良临床后果。

超声心动图目前是非侵入性方法中获得舒张期指标的标准方法, 然而, 心脏移植术后患者的左房大小不一, 使得对舒张异常的评价变得十分复杂。高时间分辨率电影 CMR 提供了一个评估心室舒张功能的选择。Amin 等使用高时间分辨率 CMR(平均 TR 11.85 ms)SSFP 序列评估舒张指数、等容舒张时间(IVRT), 发现与超声心动图相比的一致性很好。因此, CMR 获得的 IVRT 值可作为评估移植术后患者舒张功能和同种异体移植排斥反应的一个替代标准。此结论正在更大的样本进行证实。

Yonezawa 等使用间碘苯甲胍显像(^{123}I -MIBG)和标记 MRI (Tagged MRI)评估非缺血性心衰患者心脏交感神经活性(cardiac sympathetic activity)受损和空间不同步(spatial dyssynchrony)的关系, 在 ^{123}I -MIBG 上测量心脏/纵膈比(heart-to-mediastinum ratio, H/M ratio)。左室不同步采用电影 MR 标记的心肌周向应变传递时间曲线(time-curves of myocardial circumferential strains delivered)来评估。时间不同步定义为室间隔和游离壁的收缩延迟 $>110 \text{ ms}$ 。空间不同步定义为两条应力时间曲线最大相关为负值。结果发现非缺血性心衰的患者, 心脏交感神经活性受损和空间不同步相关。同时评估左室不同步和心脏交感神经功能可能为心衰患者诸如倍他乐克或心脏再同步治疗提供信息。Imai 等发现, 电影 MRI 通过多组织跟踪得到的左房功能和通过 T_1 Mapping 得到的左室弥漫性纤维化有关: 增强后低 T_1 值与高左房容积、左房射血分数、更低的应力、更低的应变速率绝对值相关。不考虑心肌疤痕存在的情况下, 更低的左房功能与左室纤维化增加有关。因此认为, 左房功能是左反映室纤维化的一项重要标志。

Resta 等对经皮肺动脉瓣植入术(PPVI)后患者使用 CMR 进行长期随访, 发现 PPVI 后 4 年, 右室射血分数(RV EF)和收缩末期容积指数(ESVI)明显升高。左室收缩功能有边缘的显著改变。因此, CMR 可用于 PPVI 术后的非侵入性长期随访。

房颤(AF)伴有左房收缩和舒张功能的明显异常。Khurram 等对 55 例 AF 患者分析 CMR 测量的左房收缩、舒张功能与侵入性检测的左房压力的关系, 发现左房收缩功能随年龄增

加而减低,存在 AF 时亦减低。反复 AF 消融后左房功能也有很高的功能失调趋势。左房舒张和收缩功能在房颤患者中的改变呈相同的趋势。

心房-食管瘘是房颤外科心内膜和经皮心内膜射频消融术一种致命的并发症,在导管消融术后发生的概率为 0.03%~0.50%。CMRA 通常用于得到术前的 3D 图像,用于生成电-解剖图一步步引导 AF 消融的策略。Rapellino 等在 MRA 过程中采用口服钆贝葡胺显影食管的方法:静脉注射对比剂的同时,口服 2~3 汤匙的胶化溶液(0.8~1.0 ml 钆贝葡胺和约 50 mg 的稠化水凝胶),随即开始扫描。结果所有患者食管显影良好。无即时的或延迟的并发症,证明在 MRA 过程中口服造影剂进行食管显影是可行的,可以将食管的解剖图像集成至电解剖图像中,预防 AF 消融术中食管的损伤。

Lin 等在 1.5T 和 3T 上定量评估钆磷维塞三钠(gadofosveset trisodium)和 GD-DTPA 对 T_1 增强的影响,使用 MOLLI 序列,扫描心室中间部短轴层面,注射对比剂前、注射对比剂后每隔 5 min 直到 45 min,结果发现增强后 T_1 对比受到时间、对比剂类型、场强的影响,3T 上血池和心肌的 T_1 对比明显强于 1.5T。Gd-DTPA 的 T_1 组织强化衰减速度明显较快。以上特点有助于优化 MRA 扫描序列以定量评估心血管疾病。

心脏 MR,尤其是延迟强化(LGE)能为糖尿病(DM)患者提供有价值的预测信息。但是,DM 是一系统性疾病,影响小血管和大血管供血区。Bamberg 等对 65 例 DM 患者行全身 MRI 扫描(WB-MRI,包括头、心脏、大动脉、颈动脉、腹部、盆腔、周围动脉)并电话随访 5 年,发现对于 DM 患者,使用 WB-MRI 进行系统性的评估比 CMR 能提供更高的预测信息。

心肌负荷灌注 MRI 是探测流量受限的冠脉狭窄有用的手段。然而文献报道冠脉搭桥后心肌负荷灌注 MRI 的敏感性降低。Ito 等联合使用 MR 流动测量(MR Flow Measurement)冠脉搭桥、使用负荷灌注 MRI 探测移植血管狭窄,发现 MR 移植血管流动测量联合 MR 负荷灌注扫描能对 CABG 术后移植血管狭窄进行十分准确的诊断,其敏感度为 87%,特异度为 86%。

Xia 等使用 7.0T MR 对鼠急性心肌缺血模型进行 MRI 扫描(包括优化 T_2 -mapping 序列和 LGE 序列),发现再灌注组(MI30,左前降支冠脉闭塞 30 min)和心肌梗死组(MI,永久结扎左前降支)心肌水肿区域的 T_2 值无明显差异。MI 梗死区域明显大于 MI30。两组水肿区域无明显差异。LGE 与 TTC 染色发现的梗死区域无差异。鼠心肌缺血 30 min 后,再灌注能减少心肌梗死,但是不能减少危险区域和水肿。

冠脉 MRA

Uno 等探讨了超高分辨力(SR)技术全心冠脉 MRA 诊断冠脉狭窄的价值,发现高分辨力全心冠脉 MRA 使用 SR 技术后可以非侵入性的探测冠脉狭窄,较常规双立方插值法图像质量明显提高,能更加准确的发现冠脉狭窄,其可信度较常规双立方插值法高。

主动脉、肺动脉疾病

Kichang 等回顾性研究发现,对于行主动脉瓣膜置换的患者,人工瓣膜下软组织并不常见,但可导致通过人工瓣膜的流速受限。心脏 CT 可作为评价人工瓣膜下软组织的有效工具,

而传统的超声心动图无法评价。ECG 门控 320 排 CT 评价右室形态及功能可判断肺动脉高压患者短期预后。Koya 等研究 56 例肺动脉高压患者,发现 ECG 门控 320 排 CT 的 4D 图像定性与定量评价右室形态及功能显示右室收缩末期容积可以预测肺动脉高压患者的短期预后,可考虑作为肺动脉高压患者短期预后不良的标志。Rengier 等在 1.5T MR 上对主动脉狭窄修复术后患者使用 4D 流动 MRI 得到非侵入性 4D 压力分辨图(4D Pressure Difference Mapping),压力分布图明显增加了对主动脉狭窄修复术后患者主动脉压力和峰值压力的分辨能力,与健康志愿者相比,主要在主动脉弓和近端降主动脉。此技术能定量测量主动脉压力异常的特征,可能有助于明确主动脉狭窄修复术后的病理生理学状况。

心脏 MR 弹性成像(CMRE)是一种非侵入性的评估心肌硬化的方法,能潜在地促进更好的理解右室肥大的影响。Silveira 等使用 CMR 对先天性肺动脉狭窄右室进行弹性成像,没有发现室壁厚度或心肌质量随着硬化明显增加,表明厚度或质量不能反映右室心肌肥大固有的机械性质。

Entezari 等使用 4D 流动 MRI(4D Flow MRI)评估肺动脉近端峰值流速(peak velocity)、净流量(net flow)、血管直径和管壁剪切应力(WSS),发现肺动脉高压(PAH)的患者肺动脉干、左、右肺动脉的血液净流量、峰值流速、明显低于控制组。PAH 患者动脉直径明显大于正常人群,WSS 也有减低。4D flow MRI 能显示 PAH 患者血流动力学的改变。

Koo 等对 101 名 AR 患者使用心脏 CT 对主动脉反流(aortic regurgitation,AR)进行功能性分级,结果发现 CT 在 AR 功能性分级方面和外科检查、经食管超声心动图(TEE)的结果高度一致(96.7%),并能显示瓣膜形态学的细节,有助于做出主动脉瓣修复的决定。

Mirzaee 等使用 4D 相位对比 MRI(PC MRI)评价动脉脉搏波流速(arterial pulse wave velocity,PWV):前瞻性心电门控相位对比序列。使用本中心自行开发的软件进行后处理。通过横断面自动计算 PWV,10 mm 间隔,从主动脉根部上方数 mm 开始扫描。每个平面,计算一个流动曲线。通过这些流动曲线得到特定的时间点,然后用这些点拟合一条符合整个流动的直线。该直线的斜率用于确定 PWV 的值。该技术可作为无创测量主动脉 PWV 的一项选择。

Malone 等使用不同的 MRI 序列对 15 例患者经皮肺动脉瓣置换术(PVR)前评估导管尺寸:梯度回波电影(收缩末期和舒张末期测量)、TSE T_1 WI(收缩期)、3D 钆增强 MRA 和 3D SSFP。测量右室-肺动脉流出道(RV-PA))的大小。结果显示梯度回波电影在收缩末期测量与 DSA 的一致性最好。术前 MRI 评估有助于降低经皮 PVR 术的失败率。

Wang 等在 3T MR 上使用 PC-MRI 定量测量双向 Glenn 分流术后患者主肺动脉侧支循环(APCF)和心内分流(intracardiac shunt flow, ICSF),使用以下公式:APCF = QS - QV, ICSF = 2QS - (QV + QP),QS 为每分钟主动脉血流、QP 为肺动脉血流、QV 为静脉返流。结果证明,对于双向 Glenn 分流术后患者,使用 MRI PC 序列可以得到大血管的血流参数,可以定量计算 AFCF 和 ICSF。该技术对治疗方案的制定和评估预后可能起重要作用。

先天性膈疝是一种常见的引起肺动脉高压的先天疾病。

Phillips 等在先天性膈疝(CDH)鼠模型上使用标本 CT 扫描仪(Scanco microCT 40)、 $8\mu\text{m}$ 的分辨率评估肺血管。与显微镜计数结果相比,使用标本 CT 扫描仪定量分析鼠肺血管是可行的,未来可能可以将这项技术用于儿童。Weidne 等分别使用高时间和空间分辨力 MRI 定量测量肺部灌注,结果发现 2 岁儿童经过 CDH 修复术后,同侧肺灌注明显降低。高时间分辨力和较大的体素能获得较好的峰值信号噪声比,明显减低了对肺血流量的低估。 1.5 s 的时间分辨力、 2 mm^3 各向同性像素足够分辨两侧肺的灌注差异。

肺动脉瓣置换术(PVR)中左前降支(LAD)的外在压迫非常少见,但是是一潜在的后果严重的并发症,需要术前使用高选择性冠脉造影进行球囊扩张实验来评估风险。如果 LAD 显示有闭塞,则不能行 PVR。CMR 是测量右室(RV)大小的金标准,并能确定 PVR 的最优时机。尽管 LAD 的解剖在 CMR 上很清晰,右室-肺动脉(RV-PA)流出道和 LAD 之间的细小分隔是否能保护 LAD 免受压迫仍是未知的。Malone 等回顾性分析 PVR 术患者的图像发现,LAD 和 RV-PA 流出道之间的心外膜脂肪环形成套袖能降低 LAD 在经皮 PVR 术中受压的风险。

先天肺动脉闭锁(PA)伴有主肺动脉侧支循环(MAPCA)的患儿需要早期外科手术重建其中心肺动脉。该手术需要精确地了解所有肺供血血管的情况,目前是通过导管血管造影(CA)来进行,3D CTA 的信息进行补充。因为每例患者的血管解剖都不同,所以显示这些血管非常具有挑战性。近来发展的头部立体跟踪系统(head tracked stereoscopic system)可以自由、“全息”的操作、观察目标。Chan 等使用该方法对 9 例新生患儿进行评估。其敏感度、特异度、符合率分别为 90%、91% 和 91%,推荐用于评估先天性肺血管异常。

Capitolo 等分别使用食管超声心动图(TEE)、多排 CT、MRI 估计导管主动脉瓣植入/置换(TAVI/R)所需假体尺寸,发现与手术所得瓣环直径相差在 $\pm 2\text{ mm}$ 内的比例分别为 71%(TEE)、76%(MRI)和 80%(MDCT)。MDCT 和 MR 看似要优于 TEE,但是 MDCT 和 TEE 对直径较小的瓣环会估计偏大;而 MRI 对所有直径的估计偏大。Blanke 等发现在估计导管主动脉瓣植入/置换(TAVI/R)所需假体尺寸方面,和文献报道的经食管超声心动图相比 CT 上基于面积测量出的瓣环直径偏大似乎是安全的,发生相关的瓣膜旁反流的概率更小。因此,CT 在平面上评估主动脉瓣环假体尺寸偏大有利于减少瓣

膜旁反流的发生。Pontone 等比较 MRI 和多排 CT 测量主动脉瓣植入术患者的主动脉根部直径(AoA)的准确性:共 50 例患者,SSFP 电影序列:扫描主动脉根部和升主动脉的两个长轴位,然后扫描垂直 AoA 的短轴电影。发现 CMR 评估 AoA 的大小、主动脉瓣叶长度、冠脉开口高度与 MDCT 一样精确。Krazinski 等对 44 例患者在主动脉瓣置换术前 CT 使用低剂量、低浓度对比剂扫描:回顾性心电门控 CCTA 完成后,立即行髂股动脉高螺距 CTA,使用低浓度碘对比剂(320 mg I/mL)基于碘递送率(IDR) 1.28 gI/s 或 BMI 决定对比剂剂量。结果发现回顾性心电门控心脏 CTA 和随后的高螺距髂股动脉 CTA 是可行的,可以减少 CM 的用量而不降低图像质量,可用于有明显伴发疾病的患者 TAVR 术前扫描。Blanke 等使用 CT 对 TRVI 术前患者评估,发现主动脉狭窄的患者,主动脉瓣环的尺寸受性别、体表面积和左室的几何形态的影响。左室收缩末期容积较大,则瓣环直径较大。Leipsic 等对 10 个国家、17 个中心、共 37 例患者球囊扩张的 TAVR 术中瓣环损伤的相关解剖学和手术特点进行分析,发现左室流出道钙化、扩张瓣环区域过大与主动脉根部在 TAVR 球囊扩张假体过程中破裂的关系很大。这个结论需要更大的样本量来证实。

Schneider 等发现 TAVI 术前行 CT 增强扫描的患者中,肾小球滤过滤(GFR)为 30、30~60、超过 60 ml/min 的对比剂肾病(CIN)发病率分别为 13.6%、10.9% 和 6.8%。发生 CIN 和未发生 CIN 的患者平均对比剂用量分别为 101 和 92 mL ($P < 0.05$),强烈提示 CIN 的发生与对比剂的用量有关。因此认为主动脉瓣狭窄 AS 患者行增强 CT 发生 CIN 的风险很高,并且与患者的 GFR 有关。

Bamra 等在胸主动脉 3D 增强 MRA 分别使用钆磷维塞(Gadofosveset)和钆贝酸盐,发现胸主动脉稳态 3D 增强 MRA(SS CE-MRA)在早期平衡期(5 min 内)扫描,高弛豫对比剂的效果和血池对比剂的效果是一样的。因此血池对比剂并不是必须的。Maroules 等对 700 例代谢综合征患者使用 1.5T MR 评估升主动脉顺应性(AC)和主动脉弓流速(PWV)。监测参与者的心血管死亡、非致命性心脏事件、非致命性心血管外事件,追踪(7.8 ± 1.5)年。发现 MRI 上动脉硬化是代谢综合征患者心血管事件和死亡率的独立预测因素。

(收稿日期:2014-01-26 修回日期:2014-02-01)