专家述评

COVID-19心血管并发症诊断中的医学影像技术应用述评

尹立雪[1,2,3]，丁戈琦[1,2,3]

1.四川省医学科学院·四川省人民医院（电子科技大学附属医院）心血管超声及心功能科（成都 610072）；2.超声心脏电生理学与生物力学四川省重点实验室（成都 610072）；3.四川省心血管病临床医学研究中心（国家心血管疾病临床医学研究中心四川分中心）（成都 610072）

【摘　要】2019冠状病毒病（coronavirus disease 2019，COVID-19）的大流行引发了全球公共卫生危机。其中COVID-19相关的心血管并发症受到了广泛关注。对COVID-19患者心血管损伤的及时精准诊断和有效干预治疗以及后续长周期管理对该类患者的短期和长期预后至关重要。适当而又充分的应用包括超声心动图等在内的医学影像技术，能够在COVID-19相关心血管并发症早期系统性诊断中发挥关键作用。本文系统述评了各种心脏影像技术在诊断和评估COVID-19心血管并发症的临床应用现状与价值。

【关键词】2019冠状病毒病；心血管；医学影像技术
【中图分类号】R540.4　　文献标志码　A　　DOI：10.3969/j.issn.2096-3351.2023.04.003

Review of the application of medical imaging technology in the diagnosis of cardiovascular complications associated with COVID-19

YIN Lixue[1,2,3]，*DING Geqi*[1,2,3]

1.*Department of Cardiovascular Ultrasound and Non-invasive Cardiology, Sichuan Provincial People's Hospital, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610072, China*；2. *Ultrasound in Cardiac Electrophysiology and Biomechanics Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China*；3. *Sichuan Provincial Clinical Research Center for Cardiovascular Diseases (Sichuan Branch of National Cardiovascular Diseases Clinical Research Center), Chengdu 610072, China*

【**Abstract**】The pandemic of coronavirus disease 2019 (COVID-19) has triggered a global public health crisis, and the cardiovascular system complications caused by COVID-19 virus infection have attracted widespread attention. Timely and accurate diagnosis, effective intervention treatment, and subsequent long-term management of cardiovascular injuries in COVID-19 patients are crucial for short-term and long-term prognosis. The appropriate and sufficient use of medical imaging techniques, including echocardiography, plays a key role in the early systemic diagnosis of COVID-19-related cardiovascular complications. This article systematically reviews the current clinical applications and value of various cardiac imaging techniques in the diagnosis and assessment of COVID-19 cardiovascular complications.

【**Key words**】COVID-19；Cardiovascular；Medical imaging technique



专家简介：尹立雪，电子科技大学附属医院·四川省人民医院心血管超声及心功能科主任兼超声医学研究所所长，心脏中心执行主任，四川省心血管病临床医学研究中心（国家心血管病临床医学研究中心分中心）主任，超声心脏电生理学与生物力学四川省重点实验室主任，四川省超声医学质量控制中心业务主任。卫生部有突出贡献中青年专家，国务院政府特殊津贴专家，四川省学术和技术带头人，四川省卫计委首席专家、天府名医、四川省先进工作者。获得中国医师协会超声医师分会中国杰出超声医师奖、中国医师协会心内科医师分会工作优秀奖和中国超声医学工程学会全国优秀超声医学专家称号等专业荣誉。主编学术型专著《超声心脏电生理学》和《超声心脏力学》2部、实用型专著10余部，主持翻译学术专著2部，参编国内外学术专著和教材20余部。在国内外期刊发表学术论文300余篇，其中50余篇在*JACC*、*JASE*、*EHJ-CVI*、*PACE*等SCI和EI收录杂志发表。获国家发明和实用新型专利授权14项、软件著作权登记2项。主持制定6项全国心血管疾病诊断指南、规范和专家共识。获得四川省科技进步一等奖3项、二等奖1项、三等奖4项，中华医学科技奖三等奖2项，成都市科技进步三等奖2项。E-mail：yinlixue_cardiac@163.com

基金项目：电子科技大学中央高校基金项目（ZYGX2020ZB038）
并列第一作者：丁戈琦，E-mail：pldgq123@163.com
引用本文：尹立雪，丁戈琦. COVID-19心血管并发症诊断中的医学影像技术应用述评[J]. 西南医科大学学报，2023，46（4）：286-292，302. DOI：10.3969/j.issn.2096-3351.2023.04.003

导致全球大流行的COVID-19是由严重急性呼吸综合征冠状病毒2(SARS CoV-2，以下简称：新型冠状病毒)导致的疾病。该病的主要急性临床表现为咳嗽、发热和寒颤，伴有呼吸急促和缺氧。新型冠状病毒是一种大型、有包膜的单链RNA病毒，其通过病毒S(刺突)蛋白与宿主细胞表面的血管紧张素转换酶2(angiotensin-converting enzyme 2，ACE2)受体结合导致人体组织感染。由于人类心血管组织中广泛存在ACE2受体，因此，除了呼吸系统受累外，新型冠状病毒感染也会累及心血管系统并导致多种并发症，包括心肌炎症损伤、心律失常、急性冠脉综合征和血栓栓塞等，造成不良的临床事件和预后。与此同时，现有研究表明，感染新型冠状病毒前存在的基础性心血管疾病与感染后的成人发病率和死亡率增加有关[1]。

通过无创心脏影像学进行心血管系统损伤和基础疾病早期诊断有助于更为有效、及时的系统性干预治疗，从而降低与COVID-19感染相关的心血管发病率和死亡率。本文就各种心脏影像技术和成像模式在COVID-19相关的心血管并发症诊断和治疗中的作用以及其优势和局限性进行评述，可供临床参考与借鉴。

1 COVID-19相关心血管损伤病理生理

目前，已知的常见COVID-19相关急性心肌损伤的主要表现包括：①肺栓塞或肺动脉高压导致的右心室功能障碍；②局灶性心外膜冠状动脉主干血栓引起的急性心肌缺血(1型心肌梗死)或由直接血管感染、内皮炎、微血管重塑和继发于高凝状态的血栓形成导致的广泛微血管功能障碍、低氧血症和血氧需求/供应不匹配(2型心肌梗死)造成的血管持续收缩所导致的弥漫性心肌缺血；③心肌细胞结合病毒后与ACE2受体相互作用导致的直接或间接细胞损伤以及细胞因子风暴导致的微循环功能障碍后的心肌心包炎等[1-2]。

此外，COVID-19患者通常可能患有室上性心律失常以及严重的心动过缓，例如复杂感染中的室性心动过速和完全性心脏传导阻滞。这可能是缺氧、电解质紊乱、心肌劳损、炎症微环境和药物副作用的结果。

值得注意的是，与其他心肌病毒不同，新型冠状病毒颗粒在血管内皮细胞和心脏巨噬细胞内被发现，但从未在心肌细胞内发现。巨噬细胞浸润、炎症和微血栓是尸检时最常见的发现(48%的病例)[3]。

在急性后期和慢性阶段由于慢性和不受控制的细胞因子反应，免疫介导的机制例如分子拟态会导致持续性的心脏功能障碍。

2 超声心动图在COVID-19中的应用

经胸超声心动图(transthoracic echocardiography，TTE)是临床应用最广泛的心脏影像技术，已被作为第一线的可视化非侵入成像方法应用于疑似心血管受累的COVID-19患者中。

实施TTE检查时，既可以使用高端大型超声心动图诊断设备，也可以使用便携式或手持设备执行。这使得快速、无辐射危害的TTE检查可以在病情稳定或危重患者中实施，并在门诊、住院及重症监护等多种临床场景中使用。在选择患者进行其他心脏成像技术延伸检查、减少不必要的检查和避免诊断延误等方面起着至关重要的作用。

2020年DWECK等的一项COVID-19患者超声心动图前瞻性国际调查研究，收集了6大洲69个国家的1 216名COVID-19患者(平均年龄62岁，70%为男性)，其中667名(55%)患者发现超声心动图异常。这些患者中分别有479例(39%)和397例(33%)患者报告了左心室和右心室异常，36例(3%)有新发心肌梗死的证据，35例(3%)有心肌炎，19例有应激性心肌病(2%)，同时在182名(15%)患者中观察到较为严重的心脏疾病(严重的心室功能不全或心包填塞)。在没有基础性心脏疾病的患者(n = 901)中，46%的患者显示超声心动图异常，其中13%发现严重心血管异常。在超声心动图发现的左心室异常中，其独立预测因子是B型利钠肽和心肌肌钙蛋白的升高，而右心室异常提示COVID-19的严重程度较大。超声心动图的及时诊断改变了33% COVID-19患者的临床诊断和治疗管理决策[4]。

2.1 心室形态重塑及容量功能异常

新型冠状病毒感染导致心肌损伤时超声心动图可表现为完全性或局限性左右心室重塑及收缩功能障碍。

右心室(right ventricle，RV)结构和功能损伤在COVID-19患者中受到了极大的关注。在现有的几项队列研究和多中心研究中发现，RV扩张和收缩功能障碍非常普遍。2020年BONNEMAIN等[5]回顾了151篇关于COVID-19患者超声心动图研究的学术论文，发现RV改变是最常见的发现，高达49%的患者出现RV扩张，高达40%的患者出现RV收缩功能障碍。RV结构和功能损伤的结果与肺脏受累的严重程度和肺动脉高压相关，并且与心肌损伤(肌钙蛋白和NT-pro-BNP)、炎症程度(C-反应蛋白)和血栓形成前状态(D-二聚体)的生物标志物水平升高相关。SZEKELY等[6]的一项研究观察了100名轻度至重度的COVID-19住院患者。在入院后24小时内实施TTE检查时最常见的超声异常涉及RV。通过面积变化分数和S′测量发现，39%的患者出现伴或不伴有收缩功能障碍的RV扩张。相比之下，仅在10%的患者中观察到左心室(left ventricular，LV)收缩功能障碍，其中两名患者(2%)患有已知的缺血性心脏病。

同期来自HINDOCHA等[7]的一项单中心回顾性研究显示，74名因COVID-19住院的危重成人患者大多数需要机械通气和超过一半需要升压药物支持。在该患者队列中，观察到的主要心脏异常分别是41%出现RV扩张和27%合并RV收缩功能障碍。这些变化与D-二聚体和C-反应蛋白升高相关。RV收缩障碍主要与径向收缩功能降低有关，主要表现为面积变化分数（fractional area change, FAC）的异常。而由三尖瓣环收缩期峰值位移（tricuspid annular plane systolic excusion，TAPSE）所测量的RV纵向收缩功能则相对保留完好。因为并非所有COVID-19患者都接受了CT肺血管造影（CTPA），在RV收缩功能障碍患者中，尽管已有20%的患者被诊断为肺栓塞，但真实的肺栓塞数字可能更高。在随后对164名因COVID-19住院的患者进行的较大样本多中心回顾性研究中发现，RV扩张和RV收缩功能障碍的患病率同样很高[8]。尽管TAPSE的减低与患者死亡率增加显著相关，但是通过右室面积变化分数观测到的收缩功能障碍比TAPSE方法观测到的RV收缩功能异常更为常见。

2020年KIM等[9]重点关注了美国纽约三家医院收治的510名COVID-19患者的RV异常。通过二维超声心动图测量RV大小（使用右心室基底横径＞4.1 cm的截止值来定义RV扩张），通过TAPSE或S′测量评估RV收缩功能（两者均异常才能诊断RV收缩障碍）。其中35%的患者存在RV扩张，15%的患者存在RV功能障碍。在RV扩张和收缩功能保留的患者中，基底横径为（4.8 ± 0.5）cm，S′为（12.3 ± 4.6）cm/s，TAPSE为（1.8 ± 0.6）cm。在RV收缩功能障碍患者中，基底横径为（4.3 ± 1.0）cm，S′为（8.4 ± 1.3）cm/s，TAPSE为（1.3 ± 0.2）cm。上述研究证明了RV不良重构（定义为RV功能障碍和/或扩张）与早期死亡率之间的密切关联性。此外，RV不良重塑的存在提供了超过生物标志物和标准临床标志物的增量预后作用。有趣的是，尽管LV射血分数（eject fraction，EF）与死亡率无关，但RV重构的两种影像学标志物都与EF降低所导致的LV收缩障碍相关。

一项涉及美国密歇根州八家医院的多中心研究（主要基于重症监护病房），同样反映了COVID-19患者较高的RV异常患病率。在1 780名住院患者中，有66名患者接受了TTE检查，有71%的患者出现了RV扩张[10]。虽然70%的患者LV壁厚度增加，但LVEF降低并不常见（3%）。在该项研究中，RV扩张由RV与LV基底横径的比值来定义，而不是基底内径的绝对值。与迄今为止的大多数其他研究不同，该研究评估RV收缩功能是通过视觉观察确定而不是定量评估的，这是该项研究的局限性。

ARGULIAN等[11]的一项单中心回顾性研究中使用针对性超声心动图观测方案进一步研究评估了COVID-19住院患者的RV和LV大小以及收缩功能。观察对象包括接受连续观测的105名COVID-19患者，其中30%接受了插管和机械通气。在31%的患者中发现了RV扩张，并且是多变量分析中唯一独立的死亡率预测因子。RV收缩功能异常在RV扩张患者中更为常见。LV大小和LVEF在有或没有RV扩张的患者之间没有差异。在10名RV扩张患者中，实施了CTPA，并在这一小部分患者中发现了肺栓塞。RV扩张可能与许多伴随因素有关，包括ARDS、呼吸机参数或直接心肌损伤相关的缺氧性肺血管收缩等。

在其它病例报告和研究[12-13]中，报告了双心室结构和功能异常。ALI BARMAN等[14]的一项研究报告显示，在hs-cTnI升高的COVID-19患者中，相比于非重症组，重症组双心室扩张和收缩功能障碍的发生率更高。

COVID-19导致的心肌损伤中，经由临床证实的心肌炎较为少见。在急性病毒性心肌炎的COVID-19患者中，超声心动图通常会发现左或右心室或双心室收缩和舒张功能障碍。病毒感染将有可能导致心肌组织急性炎症细胞浸润、间质水肿，心室壁增厚，质量增加，心室节段性或整体性扩张，与冠脉分布不匹配的室壁运动异常和心肌收缩力降低[15]。当COVID-19患者因急性发作的心脏症状或心电图改变而怀疑心肌炎时，应同时进行心肌肌钙蛋白和床旁超声心动图检查，可联合肺部超声评估。这同样适用于出现电生理或血流动力学不稳定的患者。应特别注意影像学和实验室标志物的变化或趋势，而不是单一测值改变。应当依据实验室和超声心动图的检查结果以及患者的临床状态，来决定进一步的侵入性或无创诊断性检查，这一点在暴发性心肌炎诊断时尤为重要。可能的主要鉴别诊断包括应激性心肌病、脓毒症相关性心肌病和急性冠脉综合征等[16]。THEETHA KARIYANNA等[17]在他们的综述中纳入了11篇文章，9项是病例报告，2项是回顾性研究。患者就诊时主诉为呼吸困难，其次是咳嗽、发热和胸痛。所有的研究报告显示肌钙蛋白I或T以及心肌肌酐激酶和脑利钠肽升高。心电图显示5例ST段抬高，3例T波倒置。在其中6项病例研究中，超声心动图均显示LVEF降低。

2.2 肺动脉收缩压升高

肺动脉压升高的病因，可能是肺炎、左心系统或右心系统功能障碍的直接后果。一项针对200名非ICU患者的单中心研究表明：出现肺动脉高压的患者年龄更大，既往心脏合并症的负担更高，以及具有更严重的呼吸系统病毒感染迹象（如放射影像发现肺部受累、实验室结果和氧合状态异常）。肺动脉高压的存在与更高的院内死亡率或ICU入住率相关[18]。其它相关研究同样确定了肺动脉收缩压增高在COVID-19患者评估

中的重要性。结果表明：在随后死亡的COVID-19患者中，这一类肺动脉高压患者比例高于幸存者[19]、RV功能受损更重的患者、COVID-19疾病严重程度更高的患者、重症COVID-19患者双心室射血分数正常以及ARDS患者，并且伴有明显RV功能障碍或扩张[14,20-21]。

2.3 心室心肌力学功能异常

应用超声斑点追踪成像（speckle tracking echocardiography，STE）技术可以对心肌组织的斑点回声进行追踪，有助于理解心肌的生理功能状态和机械变形，能够评价整体和局部的心室功能，从而更早期和敏感地评估心肌功能异常。与传统的二维TTE相比，STE提高了诊断LV和RV收缩和舒张功能障碍的准确性。因此在有条件的情况下，推荐采用STE进行心室收缩功能的评估。

LI等[19]使用STE连续检查了120名COVID-19住院患者的RV纵向应变（right ventricular longitudinal strain，RVLS）变化。在这项研究中，RVLS是COVID-19住院患者死亡的有力预测指标，优于RV FAC或TAPSE。RVLS预测COVID-19住院患者死亡率增加的最佳截断值为23%，灵敏度为94%，特异性为65%。作者推测RVLS可能比传统的RV收缩功能标志（如FAC和S′）能够更早地识别RV功能障碍。因为该参数结合了整个RV游离壁，而不仅仅是基底游离壁，并在整个心动周期中跟踪心肌运动状态。此外，与TAPSE和FAC不同，RVLS的测量不受超声波声速入射角度的限制。虽然RVLS可独立于LVEF预测死亡率，但需要特别指出的是该组病例并未通过LV应变分析进行LV收缩功能评估。

一项单中心研究通过超声二维斑点追踪成像技术连续分析了100名轻度至重度COVID-19住院患者左心室心肌功能状态。结果显示，该组患者左室整体纵向应变（LVGLS）和右室游离壁纵向应变（RVFWLS）分别降低了42%和38%，而LVEF在较小比例（11%）的患者中降低。两种心室应变指数均具有预后价值，其中LVGLS预测死亡率，RVFWLS预测插管或死亡的组合的效率较高[22]。

BAYCAN等[20]研究了观测STE纵向应变在LVEF和RVEF保留COVID-19患者的亚临床心室功能障碍评估中的作用。连续2周内对100名LVEF≥50%的住院COVID-19患者进行LVGLS和RVLS以及常规二维超声测量。患者被分为重症和非重症COVID-19组，并与无COVID-19的对照组进行比较。与其他两组相比，重症COVID-19组的RV内径最大。与非重症组和对照组相比，重症组的LVGLS和RVLS均降低，通过多变量分析均与院内死亡率独立相关。尽管各组之间的LVEF没有差异，但是LVGLS和RVGLS在三组之间均有显着差异，在对照组中最高，在重症组中最低。

两项已发表的评估纵向应变的研究结果同样表明了LVGLS的重要性[20,22]。研究表明仅通过二维超声心动图成像不能充分检出COVID-19患者的亚临床左室功能障碍，但COVID-19患者的亚临床左室功能障碍可以通过STE检出，并且与死亡率升高相关。与hs-cTnI、D-二聚体和SaO2相同，LVGLS和RVLS均是COVID-19患者的死亡率预测因子[20]。其机制可能是LVGLS和RVLS反映心室心肌纵向纤维功能，其位于心内膜下并容易受到早期心肌损伤和纤维化的影响，而心室心肌长轴功能可能在LVEF下降之前降低。因此，应用纵向应变测量可以在COVID-19评估中提供更敏感的早期心血管预后评估。与超声组织多普勒成像相比，STE测量的LVGLS和RVLS具有非角度依赖性和更高的可重复性[23]。

此外，实验室标志物与超声心动图标志物存在明显的关联关系。肌钙蛋白、D-二聚体、CRP升高与RV增大、FAC、S′和TAPSE降低所引起的RV功能障碍密切相关[5,8,13-14]；肌钙蛋白升高与LVGLS或LVEF测量的LV功能障碍相关，同时还与E/E′增高相关，其提示左心室舒张期充盈压明显增加[5,13,20]。

2.4 长期COVID综合征

目前已知COVID-19感染后将会导致一系列广泛的临床慢性后遗症，如：疲劳和肌肉无力、睡眠困难、窦性心动过速、焦虑、抑郁或肺功能检查异常等。这种临床现象被称为“长期COVID综合征（long-term COVID-19 syndrome）”[24-26]。超声心动图是评估呼吸困难等症状的有效工具，并在长期COVID护理的背景下增加了有价值的临床评估信息。应用超声二维应变成像，有助于更好地理解长期COVID综合征的心肌损伤进程，并提供可靠的诊断和预后信息[27]。

KARAGODIN等[28]报道了世界超声心动图学会联盟关于急性COVID-19感染患者的心室变化的随访研究。198名患有急性COVID-19感染的患者平均129天内返回随访。其中153人具有配对的基线和可分析的随访图像，包括LV体积、射血分数和纵向应变，RV整体纵向应变、RV游离壁应变和RV基底直径。该研究比较了整个队列和基于基线LV和RV功能的亚组的基线和随访时的配对超声心动图参数。结果发现，从感染中恢复的患者，其LV和RV功能没有随时间显著变化。与基线LV和RV功能比较所观察到较小差异，这可能仅反映了急性患者急性心肌损伤的恢复。LV和RV功能在基线功能受损的患者中趋于改善，而在LV高动力或RV功能正常的患者中则趋于降低。

2.5 疫苗相关心肌炎

来自双盲随机对照试验以及现实生活研究的可靠数据清楚地表明，接种疫苗在减少由COVID-19引起的住院和死亡方面具有明显的收益[29-30]。

接种疫苗的常见副作用包括局部反应(如注射部位的疼痛、肿胀等)和全身反应(如发热、疲劳、肌肉酸痛等)。在极少数情况下,接种mRNA COVID-19疫苗后,一些接种者可能会出现心肌炎[31-32]。这类心肌炎病例通常发生在接种疫苗后几天内,病情一般较轻,对保守治疗有反应,且没有典型的心肌炎或COVID-19相关心肌炎严重,临床结局较好。但仍有较重特殊的病例被报道,ZHOU等[33]报告了一例老年女性,在接受mRNA疫苗(BNT162b2)后出现暴发心肌炎、急性心衰和房颤。与其他疫苗诱发的心肌炎患者不同,其出现持续发热、咽喉痛、多关节痛、弥漫性黄斑皮疹和淋巴结肿大。经过广泛调查,被诊断为接种疫苗后成人发作Still病。使用非甾体类抗炎药和全身类固醇后全身炎症逐渐消退,出院时血流动力学稳定。

对于疑似心肌炎的患者,应通过经胸超声心动图和心脏磁共振成像进一步评估,以确认心肌心包炎,并将其与具有类似表现的其他疾病区分开来。可以使用STE成像随访此类患者的心室功能,以排除慢性心肌炎症和左心室射血分数恶化。

3 心脏计算机断层扫描在COVID-19中的应用

计算机断层扫描(CT)是评估与COVID-19相关的肺脏并发症的首选影像学方法[34],可在短时间内为不稳定的患者提供有用的信息,同时减少患者和人员的病毒暴露时间。

在最近的一份学会立场文件中,COSYNS等[35-37]指出,在COVID-19心肌损伤患者诊断工作中,冠状动脉计算机断层扫描血管造影(CCTA)应优先应用于验前概率为低至中风险的急性冠脉综合征(ACS)的患者,因为它具有较高阴性预测值,适用于肌钙蛋白血清水平升高和非ST段升高的COVID-19肺炎患者,能够减少不必要的有创冠脉造影,同时也可应用于识别因COVID-19相关血管炎引起的冠状动脉壁改变。此外,由于NSTEMI管理取决于患者的心血管风险,CCTA可以改善风险分层评估。

STEFANINI等[38]发现39% COVID-19 STEMI患者的有创冠状动脉造影结果为阴性,这可能是因为在COVID-19急性期患者中2型心梗的患病率较高。上述数据进一步支持在COVID-19患者中使用CCTA。CT还具有使用三重排除扫描方案同时排除冠状动脉疾病和肺栓塞的优势,此外还可以通过量化冠状动脉钙化评分来完善COVID-19患者的风险分层[38-39]。

肺栓塞或高血压引起的右心室功能障碍是COVID-19患者急诊情况下最常见的改变[4]。当D-二聚体水平显著升高时,CT可用于排除肺栓塞。在COVID-19患者中,肺栓塞被发现影响高达30%的住院患者,涉及主要位于实质实变区域的血管[40]。此外,肺部实变或肺外血管扩张、扩张的远端亚段血管接触胸膜或肺裂,以及马赛克衰减模式可能与血管炎症、内皮损伤、微血栓形成和血管调节功能障碍有关[41]。

此外,CT检查还可以得到有关心外膜脂肪组织衰减的信息,是与斑块易损性和COVID-19严重程度相关的炎症标志物。通常衰减范围在-45 HU和-195 HU之间,在炎症情况下衰减范围会增加[42-44]。血管评估可以与肺实质评估相结合,提供有关COVID-19肺炎严重程度和疾病分期的信息,并确定导致症状和实验室标志物改变的相关诊断[45-46]。

4 心脏磁共振成像在COVID-19中的应用

心脏磁共振(cardiac MRI,cMRI)成像被认为是疑似心肌炎无创诊断工具的重要技术方法[47-48],其可用于无创检测与急性COVID-19、后遗症和疫苗接种相关的心肌病变。

2020年SALA等[49]首先通过cMRI和心内膜心肌活检描述了一名受COVID-19影响的43岁女性的心血管受累情况,该女性患有严重的心肌水肿和反向Takotsubo运动模式,在组织学上被诊断为急性心肌炎。

COVID-19心肌炎的主要发现包括心肌水肿、心肌坏死、延迟强化和RV功能障碍[50]。PANCHAL等[51]报道,与非COVID-19心肌炎相比,cMRI观测结果表明COVID-19相关心肌炎呈现更弥漫的心肌受累。

OJHA等[52]对接受cMRI检测的COVID-19患者进行了荟萃分析。在总共34项研究和199名患者中,最常见的诊断(40.2%)是心肌炎。最常见的发现是T1(73%)和T2(63%)心肌映射值增加,延迟强化不太常见(43%)。当延迟强化存在时,其具有非缺血性模式,涉及左心室心外膜下下壁及下侧壁基底段分布的几个节段(81%)。KATO等[53]在2022年发表了一项更新的荟萃分析,包括10 462名接受cMRI检查的COVID-19患者,发现与正常人相比,左心室射血分数和右心室射血分数有轻微降低(-2.84%和-2.69%),其中左室延迟强化异常占27.5%,心包受累占11.9%,T1映射改变占39.5%,T2映射或T2加权序列改变占38.1%,心肌炎患病率为17.6%。

在疑似心肌受累的长期COVID综合征患者中,建议实施cMRI检查以排除缺血和心肌病并评估相关的心肌改变,包括心肌炎症、瘢痕和心包积液[54]。对COVID-19康复患者进行的中期随访结果表明,30%的患者出现延迟强化。这类患者往往具有较低的LV周向应变和异常的RV应变[55]。

FRONZA等[56]研究表明,与COVID-19相关心肌炎等相比,COVID-19疫苗相关心肌炎具有不同的cMRI

影像学特征，与患者的年龄或性别以及症状发作和影像学检查之间的时间间隔无关。在疫苗相关性心肌炎中，右心室和左心室射血分数、应变值和心肌原生T1值变化较小，且延迟强化范围较小，主要累及下外侧节段。

cMRI有其自身的挑战，包括可及性和适用性不足、使用成本高、检查时间长和与患者不适应等有关的挑战，如心律失常、无法屏住呼吸、幽闭恐惧症、植入金属设备和造影剂过敏等。现有专家共识建议使用特定序列而不是综合检查方案来执行重点cMRI检查，以减少成像时间。采用具有T2映射和稳态自由进动采集短方案足以评估局部室壁运动异常、收缩功能、腔室大小和体积以及水肿的存在。一旦患者更加稳定并且不再具有传染性后，就可以执行完整的钆剂延迟增强CMR方案来评估纤维化[57-58]。

5 核医学成像在COVID-19中的应用

心脏核医学成像技术需要较长的采集时间和特殊协议，这会增加感染COVID-19的风险。在COVID-19患者中，心脏病核医学成像方式的使用应仅限于临床怀疑心脏受累的患者，而其他成像方式不能使用或存在禁忌症，例如：人工瓣膜或心内装置置入的患者[59-60]。

联合18F-氟脱氧葡萄糖（18F-FDG）正电子发射断层扫描（PET）与CT已被研究作为诊断评估各种血管和心脏炎症严重程度的重要工具。PET-CT相对于cMRI的潜在优势之一是它可以量化炎症的程度，从而密切监测病程以及对抗炎和免疫抑制的治疗反应。PET-CT可被视为具有cMRI禁忌证的患者的替代方案之一[61]。

VLACHOPOULOS等[62]首先通过评估重症或危重病COVID-19患者主动脉中的18F-FDG PET/CT的摄取，研究了COVID-19对血管水平的影响。结果发现，主动脉炎症在重症或危重COVID-19患者的早期阶段增加，随着时间的推移大部分主动脉炎症消退。这可能对了解疾病的病程和改进预防和治疗策略具有重要意义。

6 小结与启示

超声心动图等无创心脏影像技术提供了COVID-19相关心血管表现的有效和非侵入性的影像学标志物，有助于更全面地系统的对COVID-19患者进行病因学和病理生理以及病理解剖学的特征描述和风险分层，有助于最大限度地减少不必要和侵入性诊断技术方法的使用，改善了临床诊断路径，为优化COVID-19患者的管理提供了及时和宝贵的可视化信息。CT和cMRI等最合适的成像模式和采集协议的选择需要结合医疗资源、COVID-19患者临床特征和使用场景进行调整应用。未来，影像学检查还可应用于与COVID-19相关的特异性治疗、抗心力衰竭和持续抗凝等相关的决策之中。

7 参考文献

[1] 中国医师协会心血管内科医师分会.新型冠状病毒感染与心血管疾病诊疗中国专家共识(2023)[J]. 中华心血管病杂志(网络版),2023,6(1):1-22.

[2] 中华医学会心血管病学分会精准医学学组, 中华心血管病杂志编辑委员会, 成人暴发性心肌炎工作组.成人暴发性心肌炎诊断与治疗中国专家共识[J]. 内科急危重症杂志, 2017,23(6):443-453.

[3] KAWAKAMI R, SAKAMOTO A, KAWAI K J, *et al*. Pathological evidence for SARS-CoV-2 as a cause of myocarditis[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2021, 77(3): 314-325.

[4] DWECK M R, BULARGA A, HAHN R T, *et al*. Global evaluation of echocardiography in patients with COVID-19 [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2020, 21(9):949-958.

[5] BONNEMAIN J, LTAIEF Z, LIAUDET L. The right ventricle in COVID-19[J]. Journal of Clinical Medicine, 2021, 10(12): 2535.

[6] SZEKELY Y, LICHTER Y, TAIEB P, *et al*. Spectrum of cardiac manifestations in COVID-19: a systematic echocardiographic study[J]. Circulation, 2020,142(4): 342-353.

[7] HINDOCHA R, GARRY D, SHORT N, *et al*. A minimum dataset for a Level 1 echocardiogram: a guideline protocol from the British Society of Echocardiography [J]. Echo Res Pract, 2020, 7(2):G51-G58.

[8] MOODY W E, MAHMOUD-ELSAYED H M, SENIOR J, *et al*. Impact of right ventricular dysfunction on mortality in patients hospitalized with COVID-19, according to race[J]. CJC Open, 2021,3(1): 91-100.

[9] KIM J, VOLODARSKIY A, SULTANA R, *et al*. Prognostic utility of right ventricular remodeling over conventional risk stratification in patients with COVID-19[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2020,76(17): 1965-1977.

[10] SCHOTT J P, MERTENS A N, BLOOMINGDALE R, *et al*. Transthoracic echocardiographic findings in patients admitted with SARS-CoV-2 infection[J]. Echocardiography, 2020, 37(10): 1551-1556.

[11] ARGULIAN E, SUD K, VOGEL B, *et al*. Right ventricular dilation in hospitalized patients with COVID-19 infection[J]. JACC: Cardiovascular Imaging, 2020,13(11): 2459-2461.

[12] INCIARDI R M, LUPI L, ZACCONE G, *et al*. Cardiac involvement in a patient with coronavirus disease 2019 (COVID-19)[J]. JAMA Cardiology, 2020,5(7): 819-824.

[13] GUO T, FAN Y Z, CHEN M, *et al*. Cardiovascular implications of fatal outcomes of patients with coronavirus disease 2019 (COVID-19)[J]. JAMA Cardiology, 2020,5(7): 811-818.

[14] ALI BARMAN H, ATICI A, TEKIN E A, *et al*. Echocardiographic features of patients with COVID-19 infection: a cross-sectional study[J]. The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2021,37(3): 825-834.

[15] CAFORIO A L P, PANKUWEIT S, ARBUSTINI E, *et al*. Current state of knowledge on aetiology, diagnosis, management, and therapy of myocarditis: a position statement of the European Society of Cardiology Working Group on Myocardial and Pericardial Diseases[J]. European Heart Journal, 2013,34(33): 2636-2648.

[16] MELE D, FLAMIGNI F, RAPEZZI C, *et al*. Myocarditis in COVID-19 patients: current problems[J]. Internal and Emer-

gency Medicine, 2021,16(5): 1123-1129.
[17] THEETHA KARIYANNA P, SUTARJONO B, GREWAL E, *et al*. A systematic review of COVID-19 and myocarditis[J]. American Journal of Medical Case Reports, 2020, 8(9): 299-305.
[18] PAGNESI M, BALDETTI L, BENEDUCE A, *et al*. Pulmonary hypertension and right ventricular involvement in hospitalised patients with COVID-19 [J]. Heart, 2020, 106(17):1324-1331.
[19] LI Y M, LI H, ZHU S S, *et al*. Prognostic value of right ventricular longitudinal strain in patients with COVID-19[J]. JACC. Cardiovascular Imaging, 2020,13(11): 2287-2299.
[20] BAYCAN O F, ALI BARMAN H, ATICI A, *et al*. Evaluation of biventricular function in patients with COVID-19 using speckle tracking echocardiography[J]. The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2021,37(1): 135-144.
[21] LAZZERI C, BONIZZOLI M, BATACCHI S, *et al*. Cardiac involvment in COVID-19 related acute respiratory distress syndrome[J]. The American Journal of Cardiology, 2020,132: 147-149.
[22] ROTHSCHILD E, BARUCH G, SZEKELY Y, *et al*. The Predictive Role of Left and Right Ventricular Speckle-Tracking Echocardiography in COVID-19 [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(11):2471-2474.
[23] KALAM K, OTAHAL P, MARWICK T H. Prognostic implications of global LV dysfunction: a systematic review and meta-analysis of global longitudinal strain and ejection fraction[J]. Heart, 2014,100(21): 1673-1680.
[24] HAYES L D, INGRAM J, SCULTHORPE N F. More than 100 persistent symptoms of SARS-CoV-2 (long COVID): a scoping review[J]. Frontiers in Medicine, 2021,8: 750378.
[25] WADE D T. Rehabilitation after COVID-19: an evidence-based approach [J]. Clin Med, 2020, 20(4):359-365.
[26] LOPEZ-LEON S, WEGMAN-OSTROSKY T, PERELMAN C, *et al*. More than 50 long-term effects of COVID-19: a systematic review and meta-analysis[J]. Sci Rep, 2021, 11(1):16144.
[27] ALTERSBERGER M, GOLIASCH G, KHAFAGA M, *et al*. Echocardiography and lung ultrasound in long COVID and post-COVID syndrome, a review document of the Austrian society of pneumology and the Austrian society of ultrasound in medicine[J]. Journal of Ultrasound in Medicine, 2023,42(2): 269-277.
[28] KARAGODIN I, SINGULANE C C, DESCAMPS T, *et al*. Ventricular changes in patients with acute COVID-19 infection: follow-up of the world alliance societies of echocardiography (WASE-COVID) study[J]. Journal of the American Society of Echocardiography, 2022,35(3): 295-304.
[29] BADEN L R, EL SAHLY H M, ESSINK B, *et al*. Efficacy and safety of the mRNA-1273 SARS-CoV-2 vaccine[J]. The New England Journal of Medicine, 2021,384(5): 403-416.
[30] BARDA N, DAGAN N, BEN-SHLOMO Y, *et al*. Safety of the BNT162b2 mRNA covid-19 vaccine in a nationwide setting[J]. The New England Journal of Medicine, 2021, 385(12): 1078-1090.
[31] MARSHALL M, FERGUSON I D, LEWIS P, *et al*. Symptomatic acute myocarditis in 7 adolescents after pfizer-BioNTech COVID-19 vaccination[J]. Pediatrics, 2021,148(3): e20210524-78.
[32] Centers for Disease Control and Prevention. Vaccines and immunizations. May 28, 2021. Accessed December 11, 2021. https://www.cdc.gov/vaccines/index.html
[33] ZHOU M, WONG C K, YEUNG W Y W, *et al*. Case report: Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) modified RNA vaccination-induced Adult-Onset Still's Disease with fulminant myocarditis as initial presentation[J]. Frontiers in Cardiovascular Medicine, 2023,10: 1066699.
[34] HOTHI S S, JIANG J, STEEDS R P, *et al*. Utility of non-invasive cardiac imaging assessment in coronavirus disease 2019[J]. Frontiers in Cardiovascular Medicine, 2021,8: 663864.
[35] COSYNS B, LOCHY S, LUCHIAN ML, *et al*. The role of cardiovascular imaging for myocardial injury in hospitalized COVID-19 patients [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2020, 21(7):709-714.
[36] SKULSTAD H, COSYNS B, POPESCU B A, *et al*. COVID-19 pandemic and cardiac imaging: EACVI recommendations on precautions, indications, prioritization, and protection for patients and healthcare personnel[J]. European Heart Journal - Cardiovascular Imaging, 2020,21(6): 592-598.
[37] FEUCHTNER G M, BARBIERI F, LUGER A, *et al*. Myocardial injury in COVID-19: the role of coronary computed tomography angiography (CTA) [J]. Journal of Cardiovascular Computed Tomography, 2021,15(1): e3-e6.
[38] STEFANINI G G, MONTORFANO M, TRABATTONI D, *et al*. ST-elevation myocardial infarction in patients with COVID-19: clinical and angiographic outcomes[J]. Circulation, 2020, 141(25): 2113-2116.
[39] PONTONE G, BAGGIANO A, CONTE E, *et al*. "Quadruple Rule-Out" With Computed Tomography in a COVID-19 Patient With Equivocal Acute Coronary Syndrome Presentation [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(8):1854-1856.
[40] PALMISANO A, VIGNALE D, TADIC M, *et al*. Myocardial late contrast enhancement CT in troponin-positive acute chest pain syndrome[J]. Radiology, 2022,302(3): 545-553.
[41] LOFFI M, REGAZZONI V, TOSELLI M, *et al*. Incidence and characterization of acute pulmonary embolism in patients with SARS-CoV-2 pneumonia: A multicenter Italian experience [J]. PLoS One, 2021, 16(1):e0245565.
[42] GRILLET F, BEHR J, CALAME P, *et al*. Acute pulmonary embolism associated with COVID-19 pneumonia detected with pulmonary CT angiography[J]. Radiology, 2020,296(3): E186-E188.
[43] IACOBELLIS G. Epicardial adipose tissue in contemporary cardiology[J]. Nature Reviews Cardiology, 2022,19(9): 593-606.
[44] IACOBELLIS G, SECCHI F, CAPITANIO G, *et al*. Epicardial fat inflammation in severe COVID-19[J]. Obesity, 2020,28(12): 2260-2262.
[45] PALMISANO A, SCOTTI G M, IPPOLITO D, *et al*. Chest CT in the emergency department for suspected COVID-19 pneumonia[J]. La Radiologia Medica, 2021,126(3): 498-502.
[46] ESPOSITO A, PALMISANO A, CAO R, *et al*. Quantitative assessment of lung involvement on chest CT at admission: impact on hypoxia and outcome in COVID-19 patients[J]. Clinical Imaging, 202177: 194-201.
[47] FRIEDRICH M G, SECHTEM U, SCHULZ-MENGER J, *et al*. Cardiovascular magnetic resonance in myocarditis: a JACC White Paper[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2009,53(17): 1475-1487.
[48] SANGHVI S K, SCHWARZMAN L S, NAZIR N T. Cardiac MRI and Myocardial Injury in COVID-19: Diagnosis, Risk Stratification and Prognosis [J]. Diagnostics, 2021, 11(1):130.
[49] SALA S, PERETTO G, GRAMEGNA M, *et al*. Acute myocarditis presenting as a reverse Tako-Tsubo syndrome in a patient with SARS-CoV-2 respiratory infection[J]. European Heart Journal, 2020,41(19): 1861-1862.
[50] KOTECHA T, KNIGHT D S, RAZVI Y, *et al*. Patterns of myocardial injury in recovered troponin-positive COVID-19 patients assessed by cardiovascular magnetic resonance[J]. European Heart Journal, 2021,42(19): 1866-1878.

(下转第302页)

training in cardiology: State-of-the-art review from the French Commission of Simulation Teaching (Commission d'enseignement par simulation-COMSI) of the French Society of Cardiology[J].Archives of cardiovascular diseases, 2021, 114 (1):73-84.
[25] NARDO M D, DAVID P, STOPPA F, *et al*. The introduction of a high-fidelity simulation program for training pediatric critical care personnel reduces the times to manage extracorporeal membrane oxygenation emergencies and improves teamwork[J]. J Thorac Dis,2018,10(6): 3409-3417.
[26] NATALIZI F, PIRAS F, VECCHIO D, *et al*. Preoperative Navigated Transcranial Magnetic Stimulation: New Insight for Brain Tumor-Related Language Mapping[J]. J Pers Med,2022, 12 (10):1589.
[27] OHTAKE S, MAKIYAMA K, YAMASHITA D, *et al*. Training on a virtual reality laparoscopic simulator improves performance of live laparoscopic surgery[J]. Asian J Endosc Surg, 2022, 15(2): 313-319.
[28] SCOTT D, BERGEN P, REGE R, *et al*. Laparoscopic training on bench models: better and more cost effective than operating room experience? [J]. Journal of the American College of Surgeons, 2000,191(3): 272-283.
[29] PEDDLE M, MCKENNA L, BEARMAN B. *et al*. Development of non-technical skills through virtual patients for undergraduate nursing students: An exploratory study[J]. Nurse Education Today,2019,73:94-101.
[30] MITCHELL L, FLIN R. Non-technical skills of the operating theatre scrub nurse: literature review[J]. J Adv Nurs, 2008, 63(1): 15-24.
[31] MASHARI A, MONTEALEGRE-GALLEGOS M, JEGANATHAN J, *et al*. Low-cost three-dimensional printed phantom for neuraxial anesthesia training: Development and comparison to a commercial model[J].PLoS One,2018,13(6):e0191664.
[32] POPOVIC B, VARLOT J, GIRARD-BERTRAND B, *et al*. Impact of Simulation-Based Training on Radiation Exposure of Young Interventional Cardiologists[J]. The American Journal of Cardiology,2022;181:25-31.
[33] BAKER C J, SINHA R, SULLIVAN M E, *et al*. Development of a cardiac surgery simulation curriculum: from needs assessment results to practical implementation[J]. The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery,2012,144(1):7-16.
[34] LAM C K, SUNDARAJ K, SULAIMAN M N. A Review of Computer-Generated Simulation in the Pedagogy of Cataract Surgery Training and Assessment[J]. International Journal of Human-Computer Interaction,2013,29(10-12):661-669.
[35] SAYOUR M H, KOZHAYA S E, SAAB S S. Autonomous Robotic Manipulation: Real-Time, Deep-Learning Approach for Grasping of Unknown Objects[J]. Journal of Robotics, 2022, 4 (30): 2585656.
[36] KREEFTENBERG H G, POUWELS S, BINDELS A J G H, *et al*. Impact of the Advanced Practice Provider in Adult Critical Care: A Systematic Review and Meta-Analysis[J]. Crit Care Med, 2019,47(5):722-730.
[37] 何昊,叶子健,舒畅.血管介入手术机器人系统关键技术及研发现状[J].中国普通外科杂志,2021, 30(12):1477-1484.
[38] 李娜,贺建安,陈阳,等.计算机辅助血管介入技术进展综述[J].计算机辅助设计与图形学报,2022,34(7):985-1010.
[39] 魏欣, 胡鸿, 钟立明, 等.术前模拟在经颈静脉肝内门体静脉分流术治疗中的价值[J]. 中国普外基础与临床杂志, 2019,26 (12): 1424-1428.
[40] 杨丽晓,侯正松,唐伟,等.近年手术机器人的发展[J].中国医疗器械杂志. 2023,47(1):1-12.

(利益冲突:无)

(收稿日期:2023-05-05;修回日期:2023-06-13)

(上接第292页)

[51] PANCHAL A, KYVERNITAKIS A, MIKOLICH J R, *et al*. Contemporary use of cardiac imaging for COVID-19 patients: a three center experience defining a potential role for cardiac MRI[J]. The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2021, 37 (5): 1721-1733.
[52] OJHA V, VERMA M, PANDEY N N, *et al*. Cardiac Magnetic Resonance Imaging in Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): A Systematic Review of Cardiac Magnetic Resonance Imaging Findings in 199 Patients [J]. J Thorac Imaging, 2021, 36 (2): 73-83.
[53] KATO S, AZUMA M, FUKUI K, *et al*. Cardiac involvement in coronavirus disease 2019 assessed by cardiac magnetic resonance imaging: a meta-analysis[J]. Heart and Vessels, 2022, 37 (9): 1570-1582.
[54] COMMITTEE W, GLUCKMAN T J, BHAVE N M, *et al*.2022 ACC expert consensus decision pathway on cardiovascular sequelae of COVID-19 in adults: myocarditis and other myocardial involvement, post-acute sequelae of SARS-CoV-2 infection, and return to play: a report of the American college of cardiology solution set oversight committee[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2022,79(17): 1717-1756.
[55] WANG H, LI R, ZHOU Z, *et al*. Cardiac involvement in COVID-19 patients: mid-term follow up by cardiovascular magnetic resonance [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1):14.
[56] FRONZA M, THAVENDIRANATHAN P, CHAN V, *et al*. Myocardial injury pattern at MRI in COVID-19 vaccine-associated myocarditis[J]. Radiology, 2022,304(3): 553-562.
[57] SAEED M, VAN T A, KRUG R, *et al*. Cardiac MR imaging: current status and future direction[J]. Cardiovascular Diagnosis and Therapy, 2015,5(4): 290-310.
[58] KELLE S, BUCCIARELLI-DUCCI C, JUDD R M, *et al*. Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) recommended CMR protocols for scanning patients with active or convalescent phase COVID-19 infection [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1):61.
[59] AGRICOLA E, BENEDUCE A, ESPOSITO A, *et al*. Heart and Lung Multimodality Imaging in COVID-19 [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(8):1792-1808.
[60] SKALI H, MURTHY V L, AL-MALLAH M H, *et al*. Guidance and Best Practices for Nuclear Cardiology Laboratories During the COVID-19 Pandemic: An Information Statement From ASNC and SNMMI [J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2020, 13(9): e011761.
[61] YILMAZ A, KLINGEL K, KANDOLF R, *et al*. Imaging in inflammatory heart disease: from the past to current clinical practice[J]. Hellenic J Cardiol, 2009, 50(6):449-460.
[62] VLACHOPOULOS C, TERENTES-PRINTZIOS D, KATSAOUNOU P, *et al*. Time-related aortic inflammatory response, as assessed with ^{18}F-FDG PET/CT, in patients hospitalized with severely or critical COVID-19: the COVAIR study[J]. Journal of Nuclear Cardiology, 2023,30(1): 74-82.

(利益冲突:无)

(收稿日期:2023-03-24;修回日期:2023-05-09)