中国临床医学
Chinese Journal of Clinical Medicine
ISSN 1008-6358
CN 31-1794/R

肺功能成像在新型冠状病毒肺炎急性及康复期病变的研究进展

刘晓玉, 单飞

DOI：10.12025/j.issn.1008-6358.2023.20221402

·综 述·

肺功能成像在新型冠状病毒肺炎急性及康复期病变的研究进展

刘晓玉，单 飞*

上海市（复旦大学附属）公共卫生临床中心放射科，上海 201508

引用本文 刘晓玉，单 飞. 肺功能成像在新型冠状病毒肺炎急性及康复期病变的研究进展 [J]. 中国临床医学，2023，30(4): 730-735. LIU X Y, SHAN F. Research progress of pulmonary functional imaging in acute and convalescent lesions of COVID-19[J].Chin J Clin Med, 2023, 30(4): 730-735.

［**摘要**］ 截至 2022 年 11 月 4 日，新型冠状病毒肺炎（coronavirus disease 2019, COVID-19）确诊病例超过 6.28 亿，死亡人数超过 657 万。肺是 COVID-19 最常累及的器官，主要表现为 COVID-19 肺炎、肺血栓栓塞等急性病变及康复期 COVID-19 相关小气道病变、肺间质纤维化。肺功能成像使用影像学成像技术对肺功能进行区域性可视化量化评估，并额外提供常规肺功能检查未涉及的区域分布及定位信息。为全面了解肺功能成像技术在 COVID-19 患者中的应用价值，本文归纳总结 CT、MRI 及核医学成像技术在 COVID-19 急性及康复期病变早期识别、诊断及随访中的初步应用，并展望各种成像模态及相关技术在未来更广泛的应用。

［**关键词**］ 新型冠状病毒肺炎；功能成像；肺血栓栓塞；小气道病变；肺间质纤维化

［**中图分类号**］ R 563 ［**文献标志码**］ A

Research progress of pulmonary functional imaging in acute and convalescent lesions of COVID-19

LIU Xiao-yu, SHAN Fei*

Department of Radiology, Shanghai Public Health Clinical Center, Fudan University, Shanghai 201508, China

［**Abstract**］ During the coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic, more than 628 million people were diagnosed and more than 6.57 million died. The lung is the most frequently involved organ of COVID-19, which is mainly manifested as COVID-19 pneumonia and pulmonary thromboembolism in acute phase and COVID-19 related small airway disease and pulmonary interstitial fibrosis in convalescent phase. Pulmonary functional imaging uses imaging techniques for regional visual and quantitative assessment of lung function, providing additional regional distribution and location information, which cannot be provided by routine pulmonary function test. In order to fully understand the application value of pulmonary functional imaging in patients with COVID-19, this review summarizes the preliminary clinical application of CT, MRI and nuclear medicine imaging techniques in the early screening, diagnosis, and follow-up of acute and convalescent lesions in COVID-19, and looks forward to the wider application of various imaging modalities and related technologies in the future.

［**Key Words**］ coronavirus disease 2019; functional imaging; pulmonary thromboembolism; small airway disease; pulmonary interstitial fibrosis

截至 2022 年 11 月 4 日，世界卫生组织公布新型冠状病毒肺炎（coronavirus disease 2019, COVID-19）确诊病例超过 6.28 亿，死亡人数超过 657 万[1]。随着新型冠状病毒的不断变异，演化出阿尔法（Alpha）、贝塔（Beta）、伽玛（Gamma）、德尔塔（Delta）和奥密克戎（Omicron）5 种“关切变异株”（variant of concern, VOC）[2]。肺是 COVID-19 最常累及的器官，虽然病毒传播能力不断增强，但患者肺部感染率逐渐降低、症状逐渐减轻，可能与病毒在肺部的复制能力减弱相关[3]。

［**收稿日期**］ 2022-08-10 ［**接受日期**］ 2022-11-04

［**基金项目**］ 科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2021ZD0111103). Supported by Science and Technology Innovation 2030—Key Project of “New Generation Artificial Intelligence” of China (2021ZD0111103).

［**作者简介**］ 刘晓玉，硕士生. E-mail：liuxiaoyu_cn@163.com

*通信作者(Corresponding author). Tel：021-37990333, E-mail：shanfei_2901@163.com

一项多中心尸检研究[4]发现，COVID-19 患者肺部病变以弥漫性肺泡损伤为主，伴透明膜形成及Ⅱ型肺泡上皮细胞不典型增生；87%（33/38）的病例在肺小动脉（直径＜1 mm）中存在与凝血障碍一致的血小板 - 纤维蛋白血栓，这在 COVID-19 死亡患者中很常见。另一项对危重型 COVID-19 患者的尸检结果[5]也显示，肺部有明显的血管病变和异常肺泡间隔充血水肿。以上病理改变在临床上主要表现为肺炎及肺血栓栓塞。COVID-19 患者康复后，其肺功能仍可能存在不同程度受损，表现为肺限制性通气功能障碍、小气道功能障碍以及弥散功能障碍等[6-7]，是后新冠综合征（post-COVID-19 syndrome）或长新冠（long COVID）的重要表现之一。同样，中国自新冠疫情暴发以来制定的《新型冠状病毒肺炎诊疗方案（试行第七版至第九版）》[8-10]中，COVID-19 患者肺部病理改变也主要表现为肺炎、肺血栓栓塞、小气道病变以及肺间质纤维化。

肺功能成像定义为使用计算机断层扫描（CT）、磁共振（MRI）和核医学成像技术对肺功能进行区域性可视化量化评估，包括无创性标记及测量全肺通气、灌注、气体交换和生物力学等肺生理学参数。肺功能成像可额外提供常规肺功能检查（PFT）所不能提供的区域分布及定位信息[11]。为全面了解 CT、MRI 及核医学成像技术在 COVID-19 肺炎、肺血栓栓塞等急性病变及康复期 COVID-19 相关小气道病变、肺间质纤维化等早期识别、诊断及随访中的作用，本文归纳总结肺功能成像在 COVID-19 急性及康复期的初步临床应用，并进行展望。

1　COVID-19 急性期肺病变

1.1　COVID-19 肺炎　胸部 CT，尤其是薄层 CT，广泛用于 COVID-19 肺炎的筛查和诊断[12]。COVID-19 肺炎 CT 典型表现为双侧肺外周及下肺分布为主的多发磨玻璃密度影（ground glass opacity, GGO）、伴或不伴实变、小叶间隔增厚（铺路石征）等[12-14]。尽管 CT 用于诊断 COVID-19 肺炎的特异度（56%）较低，但灵敏度（97%）和准确性（72%）较高[15]，有助于早期发现 COVID-19 肺炎，并为其筛查、早期诊断和治疗提供重要依据。

多项研究[16-19]证实，胸部 MRI 与 CT 对 COVID-19 特征性征象的识别具有较好或满意的一致性，并且能提供额外的病理生理信息。Torkian 等[16]发现多个 MRI 序列与胸部 CT 在识别 COVID-19 肺炎多发 GGOs、实变、网状影及反晕征等征象方面具有较高一致性，其中 T_2 加权快速自旋回波 - 快速反转恢复序列（TSE-TIRM-T_2WI）显示病变较其他序列更清楚，尤其是继发于肺实质炎性病变的水肿区。Pecoraro 等[17]也证实胸部 MRI 与 CT 在评估 COVID-19 肺炎征象方面表现出极好的一致性，同时观察到扩散加权成像（DWI）可用于评估 COVID-19 肺部炎症活动性。呼吸门控三维超短回波时间序列（3D UTE）MRI 与常规 CT 的前瞻性对照研究显示，UTE-MRI 在识别 COVID-19 肺炎 GGOs、实变及铺路石征等典型征象上与 CT 具有高度一致性，且不易受到 T_2^* 信号快速衰减和呼吸运动的影响[18]。同样，呼吸门控三维氧增强 - 超短回波时间序列（3D OE-UTE）MRI 进一步可同时生成全肺通气图，并发现病变区域肺通气功能减低[19]。尽管在 COVID-19 大流行期间，MRI 不推荐作为 COVID-19 肺炎的首选影像学检查，但作为一种无电离辐射的成像方式，MRI 可成为儿童、孕妇及短时间内需多次随访肺部 CT 患者的替代方案[16]。

氟代脱氧葡萄糖正电子发射断层扫描 /CT（FDG PET/CT）作为一种解剖与功能相结合的影像学检查方法，在评估炎症和感染性肺疾病方面也具有重要作用[20]。PET/CT 能够在细胞水平评估早期代谢及功能等分子信息[21]，FDG PET/CT 能进一步在细胞水平检测到炎性细胞葡萄糖利用增多[22]。^{18}F-FDG 是最常用的示踪剂，^{18}F-FDG PET/CT 可作为 COVID-19 肺炎的补充显示手段，特别是在无症状、临床症状无特异性及鉴别诊断困难的早期阶段[23-24]。Qin 等[23]报道了 COVID-19 大流行早期，4 例高度可疑的急性期无症状患者行 ^{18}F-FDG PET/CT 检查，结果显示肺部 GGOs 和（或）实变等病灶呈高摄取。Dietz 等[25]对 13 例非危重型 COVID-19 患者出现症状后 6～14 d 行

^{18}F-FDG PET/CT检查，发现肺部病变^{18}F-FDG摄取量均增加。Bai等[26]对重型COVID-19康复患者行^{18}F-FDG PET/CT检查，观察到残留肺部病变仍呈高代谢，存在明显炎症。尽管^{18}F-FDG PET/CT检测COVID-19肺炎灵敏度高，但特异度较低、费用高、辐射剂量大及采集时间长，限制了核医学成像技术在COVID-19肺炎中的广泛临床应用[27]。

1.2 COVID-19肺血栓栓塞 CT在肺血栓栓塞的识别与诊断中具有重要价值。Lins等[28]对COVID-19住院患者的高分辨率CT（HRCT）肺血管定量研究提示，肺血从小血管向大血管转移的“再分布”与直径低于CT分辨率的肺小血管阻力增加相一致，可能与微血栓栓塞和血管重塑相关。相较于常规CT，双能CT灌注扫描（DEPI）可用于CT肺动脉成像（CTPA），在不增加辐射剂量的情况下，同时评估是否存在肺动脉血栓和局部肺灌注异常[29]。Idilman等[29]使用DEPI评估轻至重型COVID-19患者的肺灌注，发现25.8%（8/31）患者均存在肺灌注缺血区，其中2例经CTPA证实为肺栓塞，提示大部分轻至重型COVID-19患者的肺灌注缺血区可能与系统性微血栓有关。Grillet等[30]在对重型COVID-19患者行肺DEPI时，尽管34%（29/85）患者未观察到明显肺动脉栓子，但其肺内也存在大量肺缺血区，这也可能与COVID-19相关微血栓形成有关。

灌注单光子发射计算机断层扫描/CT（Q-SPECT/CT）是一种快速、高精度诊断急性肺栓塞的可靠方法，在诊断肺栓塞方面比通气/灌注成像准确性更高[31]。Ozturk等[32]对低肺栓塞风险的轻型及普通型COVID-19患者行Q-SPECT/CT，36.6%（28/77）CT无异常者发现肺灌注缺血区，提示即使轻型及普通型COVID-19患者也有肺血栓形成。Das等[33]也发现67%（4/6）肺栓塞中、高危险度的重型及危重型COVID-19患者Q-SPECT/CT呈阳性表现。Q-SPECT/CT可用于检测外周小肺动脉血栓且灵敏度高，因此可能对COVID-19所致肺小动脉血栓栓塞也有临床诊断价值。

2 COVD-19康复期肺病变

2.1 COVID-19肺小气道病变 吸气/呼气双气相CT作为一种无创、高灵敏度的肺功能成像检查，可以用于早期发现空气滞留与小气道病变。Fleischner协会将空气滞留定义为病理生理学气道阻塞（通常是不完全阻塞）导致肺远端空气潴留。CT上空气滞留表现常用于评估肺小气道病变，肺小气道病变是指直径≤2 mm的气道病变。吸气/呼气双气相CT有助于识别空气滞留[34]。Franquet等[35]对出院1个月后仍伴有持续呼吸道症状的后新冠综合征患者行吸气/呼气双气相CT检查发现，77%（37/48）患者存在空气滞留，高度提示合并小气道病变。另一项吸气/呼气双气相HRCT评估COVID-19小气道病变多中心研究[36]显示，32.4%（35/108）患者存在空气滞留，并持续存在于2个月的随访中。Jia等[37]也发现6个月随访时的定量吸气/呼气双气相CT中，肺弥散功能受损的COVID-19患者容易出现空气滞留，可能与小气道损伤有关。一项前瞻性研究[38]显示，在初始感染后随访200 d的9例COVID-19患者中，89%（8/9）的患者仍能在吸气/呼气双气相CT上观察到空气滞留。因此，推测COVID-19患者的小气道病变可能会持续存在较长时间。在这种情况下，可以适当延长此类患者的CT随访间隔时间，并采取基于迭代重建算法的低剂量CT扫描方案，既减少了不必要的辐射剂量，又减轻了患者的经济和心理负担[35-36]。

MRI能量化评估肺通气的区域异质性，也可用于早期发现小气道病变。相位分辨肺功能（PREFUL）MRI可用于动态量化区域通气，较静态通气图对肺功能异常更敏感，采取PREFUL法的肺自由呼吸^{1}H-MRI通过对COVID-19康复患者区域通气的可视化和量化评估，发现其存在显著高于健康人的区域异质性高通气区[39]。MRI通气障碍百分比（VDP）可反映小气道异常，Kooner等[40]发现无论住院与否，康复后持续存在症状的COVID-19患者超极化氙气MRI（^{129}Xe-MRI）的VDP均增高，且有住院史的患者VDP更高，提示感染后持续存在的症状可能与小气道病变有关。因此，MRI在COVID-19康复期小气道病变早期发现及随访中具有潜在及广泛的临床应用价值。

2.2 COVID-19肺间质纤维化 肺部CT，尤其

HRCT，是评估间质性肺疾病灵敏度较高的影像学检查。Yang等[41]发现46%（76/166）的住院COVID-19患者在恢复早期（出现症状后56 d）的随访CT有纤维化表现，其中89%（68/76）的患者纤维化改变位于外周，与GGOs和实变分布一致，提示炎症的恢复过程[41]。Froidure等[42]对重型及危重型COVID-19患者进行3个月随访，发现21%（22/107）的患者HRCT上有纤维化征象，47%（58/122）的患者肺一氧化碳弥散量（DLCO）降低。Jutant等[43]也发现19.3%（33/171）的患者随访4个月后HRCT上仍可见轻度肺纤维化。Jia等[37]进一步证实COVID-19康复患者在6个月随访时，在定量双气相CT仍可见纤维化表现，并较基线CT增加。

MRI可以早期发现COVID-19所致肺间质损伤的肺功能改变。^{129}Xe-MRI是一种能够评估通气、微结构和气体交换的独特技术[44]，可通过红细胞相对于组织和血浆中的氙信号比值（RBC/TP）来评估肺功能和气体交换，比值降低表明肺内气体交换受损[45]。肺间质损伤可能导致DLCO降低[46]。Li等[44]首次将^{129}Xe-MRI用于评估COVID-19引起的肺损伤，发现其较健康个体有更高的VDP（5.9% *vs* 3.7%, P=0.039），且尽管肺微结构不变，但气血交换功能减弱，气血交换时间延长（43.5 ms *vs* 32.5 ms, P=0.038），RBC/TP减低（0.279 *vs* 0.330, P=0.041）。Grist等[47]也发现COVID-19肺炎康复出院3个月后仍呼吸困难的患者，尽管其CT表现正常或接近正常且DLCO在正常范围内，^{129}Xe-MRI仍显示RBC/TP较健康受试者减低[（0.3±0.1）*vs*（0.5±0.1），P=0.001]，肺内气体转移异常，肺泡毛细血管扩散受限。因此，^{129}Xe-MRI在检测COVID-19所致肺损伤方面，可能是一种比PFT（包括DLCO）更敏感的方法，能更好地解释后COVID-19综合征患者的呼吸困难[47]。另一项对首次感染后≥5个月的非住院及住院COVID-19患者的前瞻性研究[48]进一步证实，尽管CT表现正常，^{129}Xe-MRI仍显示健康受试组RBC/TP显著高于住院组[（0.45±0.07）*vs*（0.31±0.10），P=0.02]与非住院组[（0.45±0.07）*vs*（0.37±0.10），P=0.03]，且非住院组DLCO低于住院组[（76%±8%）*vs*（86%±8%），P=0.04]。^{129}Xe-MRI在评估COVID-19患者肺气体交换功能方面可作为胸部CT的有力补充，并可用于患者在疾病进展和肺功能恢复期间的纵向随访。

3　小结及展望

本综述归纳总结了CT、MRI及核医学等肺功能成像方法在COVID-19肺炎、肺血栓栓塞等急性病变及COVID-19相关小气道病变、肺间质纤维化等康复期异常早期识别、诊断及随访中的初步临床应用。尽管这些基于多种成像技术的肺功能成像的持续进步可提供丰富的信息，但肺功能成像图像采集时间较长、图像质量有待提高以及不同成像协议、不同成像仪器导致的图像差异，限制了其在临床的进一步推广应用[49]。人工智能，尤其是深度学习技术，可以优化图像采集时间、提高图像质量并缩小图像差异，有望加速肺功能成像在COVID-19相关肺损伤的临床转化与应用[49]。肺功能成像与人工智能的联合，有助于全面理解COVID-19相关肺通气、灌注及气体转移异常等相关病理生理学机制，并在COVID-19相关肺功能性损伤的定量、区域分布及可视化评估、动态随访中发挥重要作用。

利益冲突：所有作者声明不存在利益冲突。

参考文献

[1]　WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO coronavirus (COVID-19) dashboard[EB/OL].[2022-11-04]. https://covid19.who.int/.

[2]　WORLD HEALTH ORGANIZATION. Tracking SARS-CoV-2 variants[EB/OL].[2022-11-04]. https://www.who.int/activities/tracking-SARS-CoV-2-variants.

[3]　HUI K P Y, HO J C W, CHEUNG M C, et al. SARS-CoV-2 Omicron variant replication in human bronchus and lung *ex vivo*[J]. Nature, 2022, 603(7902): 715-720.

[4]　CARSANA L, SONZOGNI A, NASR A, et al. Pulmonary post-mortem findings in a series of COVID-19 cases from northern Italy: a two-centre descriptive study[J]. Lancet Infect Dis, 2020, 20(10): 1135-1140.

[5]　VILLALBA J A, HILBURN C F, GARLIN M A, et al. Vasculopathy and increased vascular congestion in fatal COVID-19 and acute respiratory distress syndrome[J].

Am J Respir Crit Care Med, 2022, 206(7):857-873.

[6] 薛鳗玲, 许晓悦, 王玉玲, 等. 新型冠状病毒肺炎康复个体HLA-A*02 限制性CD8$^+$T细胞免疫应答研究[J]. 空军军医大学学报, 2023, 44(7):602-608. XUE M L, XU X Y, WANG Y L, et al. Research on HLA-A*02 restricted CD8$^+$T cell immune responses in recovered individuals with COVID-19[J]. Journal of Air Force Medical University,2023,44(7):602-608.

[7] YE L Y, YAO G F, LIN S X, et al. The investigation of pulmonary function changes of COVID-19 patients in three months[J]. J Healthc Eng, 2022, 2022: 9028835.

[8] 中华人民共和国国家卫生健康委员会办公厅, 国家中医药管理局办公室. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第七版)[J]. 中国医药, 2020, 15(6): 801-805. General Office of National Health Commission of the People's Republic of China, Office of National Administration of Traditional Chinese Medicine. Diagnosis and treatment protocol of COVID-19 (7th trial version)[J]. China Med, 2020, 15(6): 801-805.

[9] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版 修订版)[J]. 中华临床感染病杂志, 2021, 14(2): 81-88. National Health Commission of the People's Republic of China. Diagnosis and treatment plan for COVID-19 (trial version 8 revision)[J]. Chin J Clin Infect Dis, 2021, 14(2): 81-88.

[10] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第九版)[J]. 中华临床感染病杂志, 2022, 15(2): 81-89. National Health Commission of the People's Republic of China. Diagnosis and treatment plan for COVID-19(trial version 9)[J]. Chin J Clin Infect Dis, 2022, 15(2): 81-89.

[11] GEFTER W B, LEE K S, SCHIEBLER M L, et al. Pulmonary functional imaging: part 2-state-of-the-art clinical applications and opportunities for improved patient care[J]. Radiology, 2021, 299(3): 524-538.

[12] XU Y H, DONG J H, AN W M, et al. Clinical and computed tomographic imaging features of novel coronavirus pneumonia caused by SARS-CoV-2[J]. J Infect, 2020, 80(4): 394-400.

[13] SONG F X, SHI N N, SHAN F, et al. Emerging 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) pneumonia[J]. Radiology, 2020, 295(1): 210-217.

[14] YADAV R, SAHOO D, GRAHAM R. Thoracic imaging in COVID-19[J]. Cleve Clin J Med, 2020, 87(8): 469-476.

[15] CARUSO D, ZERUNIAN M, POLICI M, et al. Chest CT features of COVID-19 in Rome, Italy[J]. Radiology, 2020, 296(2): E79-E85.

[16] TORKIAN P, RAJEBI H, ZAMANI T, et al. Magnetic resonance imaging features of coronavirus disease 2019 (COVID-19) pneumonia: the first preliminary case series[J]. Clin Imaging, 2021, 69: 261-265.

[17] PECORARO M, CIPOLLARI S, MARCHITELLI L, et al. Cross-sectional analysis of follow-up chest MRI and chest CT scans in patients previously affected by COVID-19[J]. Radiol Med, 2021, 126(10): 1273-1281.

[18] YANG S Y, ZHANG Y F, SHEN J, et al. Clinical potential of UTE-MRI for assessing COVID-19: patient- and lesion-based comparative analysis[J]. J Magn Reson Imaging, 2020, 52(2): 397-406.

[19] ZHAO F, ZHENG L, SHAN F, et al. Evaluation of pulmonary ventilation in COVID-19 patients using oxygen-enhanced three-dimensional ultrashort echo time MRI: a preliminary study[J]. Clin Radiol, 2021, 76(5): 391.e33-391.e41.

[20] DENG Y, LEI L, CHEN Y, et al. The potential added value of FDG PET/CT for COVID-19 pneumonia[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 47(7): 1634-1635.

[21] KATAL S, AMINI H, GHOLAMREZANEZHAD A. PET in the diagnostic management of infectious/inflammatory pulmonary pathologies: a revisit in the era of COVID-19[J]. Nucl Med Commun, 2021, 42(1): 3-8.

[22] PRABHU M, RAJU S, CHAKRABORTY D, et al. Spectrum of ^{18}F-FDG uptake in bilateral lung parenchymal diseases on PET/CT[J]. Clin Nucl Med, 2020, 45(1): e15-e19.

[23] QIN C X, LIU F, YEN T C, et al. ^{18}F-FDG PET/CT findings of COVID-19: a series of four highly suspected cases[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 47(5): 1281-1286.

[24] SETTI L, KIRIENKO M, DALTO S C, et al. FDG-PET/CT findings highly suspicious for COVID-19 in an Italian case series of asymptomatic patients[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 47(7): 1649-1656.

[25] DIETZ M, CHIRONI G, CLAESSENS Y E, et al. COVID-19 pneumonia: relationship between inflammation assessed by whole-body FDG PET/CT and short-term clinical outcome[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(1): 260-268.

[26] BAI Y, XU J L, CHEN L J, et al. Inflammatory response in lungs and extrapulmonary sites detected by[18F]fluorodeoxyglucose PET/CT in convalescing COVID-19 patients tested negative for coronavirus[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(8): 2531-2542.

[27] RAFIEE F, KESHAVARZ P, KATAL S, et al. Coronavirus disease 2019 (COVID-19) in molecular imaging: a systematic review of incidental detection

of SARS-CoV-2 pneumonia on PET studies[J]. Semin Nucl Med, 2021, 51(2): 178-191.

[28] LINS M, VANDEVENNE J, THILLAI M, et al. Assessment of small pulmonary blood vessels in COVID-19 patients using HRCT[J]. Acad Radiol, 2020, 27(10): 1449-1455.

[29] IDILMAN I S, TELLI DIZMAN G, ARDALI DUZGUN S, et al. Lung and kidney perfusion deficits diagnosed by dual-energy computed tomography in patients with COVID-19-related systemic microangiopathy[J]. Eur Radiol, 2021, 31(2): 1090-1099.

[30] GRILLET F, BUSSE-COTÉ A, CALAME P, et al. COVID-19 pneumonia: microvascular disease revealed on pulmonary dual-energy computed tomography angiography[J]. Quant Imaging Med Surg, 2020, 10(9): 1852-1862.

[31] LU Y, LORENZONI A, FOX J J, et al. Noncontrast perfusion single-photon emission CT/CT scanning: a new test for the expedited, high-accuracy diagnosis of acute pulmonary embolism[J]. Chest, 2014, 145(5): 1079-1088.

[32] OZTURK B C, ATAHAN E, GENCER A, et al. Investigation of perfusion defects by Q-SPECT/CT in patients with mild-to-moderate course of COVID-19 and low clinical probability for pulmonary embolism[J]. Ann Nucl Med, 2021, 35(10): 1117-1125.

[33] DAS J P, YEH R, SCHÖDER H. Clinical utility of perfusion (Q)-single-photon emission computed tomography (SPECT)/CT for diagnosing pulmonary embolus (PE) in COVID-19 patients with a moderate to high pre-test probability of PE[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(3): 794-799.

[34] HANSELL D M, BANKIER A A, MACMAHON H, et al. Fleischner Society: glossary of terms for thoracic imaging[J]. Radiology, 2008, 246(3): 697-722.

[35] FRANQUET T, GIMÉNEZ A, KETAI L, et al. Air trapping in COVID-19 patients following hospital discharge: retrospective evaluation with paired inspiratory/expiratory thin-section CT[J]. Eur Radiol, 2022, 32(7): 4427-4436.

[36] HUANG R J, ZHU J F, ZHOU J G, et al. Inspiratory and expiratory chest high-resolution CT: small-airway disease evaluation in patients with COVID-19[J]. Curr Med Imaging, 2021, 17(11): 1299-1307.

[37] JIA X, HAN X Y, CAO Y K, et al. Quantitative inspiratory-expiratory chest CT findings in COVID-19 survivors at the 6-month follow-up[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 7402.

[38] CHO J L, VILLACRESES R, NAGPAL P, et al. Quantitative chest CT assessment of small airways disease in post-acute SARS-CoV-2 infection[J]. Radiology, 2022, 304(1): 185-192.

[39] WANG C, LI H D, XIAO S, et al. Abnormal dynamic ventilation function of COVID-19 survivors detected by pulmonary free-breathing proton MRI[J]. Eur Radiol, 2022, 32(8): 5297-5307.

[40] KOONER H K, MCINTOSH M J, MATHESON A M, et al. ^{129}Xe MRI ventilation defects in ever-hospitalised and never-hospitalised people with post-acute COVID-19 syndrome[J]. BMJ Open Respir Res, 2022, 9(1):e001235.

[41] YANG Z L, CHEN C, HUANG L, et al. Fibrotic changes depicted by thin-section CT in patients with COVID-19 at the early recovery stage: preliminary experience[J]. Front Med (Lausanne), 2020, 7: 605088.

[42] FROIDURE A, MAHSOULI A, LIISTRO G, et al. Integrative respiratory follow-up of severe COVID-19 reveals common functional and lung imaging sequelae [J]. Respir Med, 2021, 181: 106383.

[43] JUTANT E M, MEYRIGNAC O, BEURNIER A, et al. Respiratory symptoms and radiological findings in post-acute COVID-19 syndrome[J]. ERJ Open Res, 2022, 8(2):00479-02021.

[44] LI H D, ZHAO X C, WANG Y J, et al. Damaged lung gas exchange function of discharged COVID-19 patients detected by hyperpolarized ^{129}Xe MRI[J]. Sci Adv, 2021, 7(1):eabc8180.

[45] DIETRICH O. Detecting COVID-19-related chronic pulmonary injury with ^{129}Xe MRI[J]. Radiology, 2021, 301(1): E373-E374.

[46] QIN W, CHEN S, ZHANG Y X, et al. Diffusion capacity abnormalities for carbon monoxide in patients with COVID-19 at 3-month follow-up[J]. Eur Respir J, 2021, 58(1):2003677.

[47] GRIST J T, CHEN M, COLLIER G J, et al. Hyperpolarized ^{129}Xe MRI abnormalities in dyspneic patients 3 months after COVID-19 pneumonia: preliminary results[J]. Radiology, 2021, 301(1): E353-E360.

[48] GRIST J T, COLLIER G J, WALTERS H, et al. Lung abnormalities depicted with hyperpolarized xenon MRI in patients with long COVID[J]. Radiology, 2022: 220069.

[49] OHNO Y, SEO J B, PARRAGA G, et al. Pulmonary functional imaging: part 1-state-of-the-art technical and physiologic underpinnings[J]. Radiology, 2021, 299(3): 508-523.

[本文编辑] 殷 悦，贾泽军