·RSNA2021 聚焦·

RSNA2021 胸部影像学

周文，胡琼洁，王玉锦，陈冲，马晓玲，周舒畅，夏黎明

【摘要】 2021 年 RSNA 年会的主题是重塑影像学(Redefining Radiology)，旨在探索未来影像的新理念、新技术和新方向。2019 年底突如其来的新型冠状病毒肺炎席卷全球，与新型冠状病毒肺炎感染相关的影像学研究成为今年的新增热点。深度学习、人工智能以及影像组学热潮不减，在医学影像发展中依然占据主要地位。肺结节相关、胸部磁共振成像、双能 CT 成像、慢性肺阻塞性疾病和间质性肺病以及新颖的成像新技术(光子计数检测器、暗场 X 射线)同样值得关注。本文针对上述内容进行较全面的综述。

【关键词】 新型冠状病毒肺炎；深度学习；人工智能；影像组学；肺癌筛查；磁共振成像，慢性肺阻塞性疾病；间质性肺病；光子计数检测器；暗场 X 射线成像

【中图分类号】R563.12；R816.4；R－05 【文献标识码】A

【文章编号】1000-0313(2022)03-0282-05

DOI：10.13609/j.cnki.1000-0313.2022.03.001 开放科学(资源服务)标识码(OSID)：

新型冠状病毒肺炎

Cozzi 等描述了 142 名新型冠状病毒肺炎(COVID-19)患者入院后 6 个月高分辨 CT(HRCT)上的间质改变，6 个月的 HRCT 改变超过总肺容积的 5%被认为是改变显著。改变显著的患者将接受支气管肺泡灌洗术(BAL)和/或冷冻活检，并在 12(±1) 和 18(±1)个月时进行 HRCT 和肺功能评估的后续随访。结果显示 71/142(50%)的肺部受累症状完全缓解。其余 71 例有间质性肺改变(纤维化样和非纤维化)，41/142 改变小于 5%，30/142 改变大于 5%。其中，26/142(18.3%)显示间质纤维化改变包括普通型间质性肺炎(UIP)模式、非特异性间质性肺炎(NSIP)模式和/或机化性肺炎(OP)模式以及弥漫性磨玻璃的不确定模式。少数(1.4%)表现为特发性肺纤维化(IPF)中观察到的典型 UIP 模式。初步结果表明，从 COVID-19 康复的患者中有一半在急性感染后 6 个月具有持续的 HRCT 变化。但观察到的 HRCT 变化的临床意义尚不清楚，这些结果需要进一步评估，特别是在 12 个月的随访后，以确定 HRCT 所见是否为一种真正纤维化疾病的表现。然而 Rudas 等使用低剂量 CT(LDCT)观察了 130 名 35～80 岁 COVID-19 感染患者肺损伤的演变，发现以轻度至中度形式感染的患者，在 3～6 个月内肺组织可完全修复。在肺部残留恢复的时间演变上，合并症比年龄起着更大的作用，并且更常伴随中度和重度形式的 COVID-19。

胸部影像学检查在提供 COVID-19 患者风险分层和预后信息方面也有附加价值。Darvizeh 等探讨了胸部 CT 在 COVID-19 患者危险分层中的作用，研究纳入 15 家医院 1669 名入院后 72h 内行胸部 CT 检查的新型冠状病毒肺炎患者，对肺容积、肺炎受累百分比、冠脉钙化评分(CAC)、椎旁肌肉密度和骨密度(骨质疏松标志物)、肝脏密度(肝脏脂肪变性标志物)进行量化，结果提示胸部 CT 上显示的骨质疏松和脂肪肝与新型冠状病毒肺炎的严重程度和预后相关。Klein 等收集了 152 例 COVID-19 患者入院后 5 天内的胸部 CT 与血浆细胞因子测定结果(IL-6、IL-8 和 TNF-α)。由两名独立放射科医生根据肺部受累程度(评分 0～20)获得 CT 定性评分，并且使用由一个阅读器监督的分割软件进行 CT 定量分析，计算总肺体积、通气肺体积、磨玻璃样阴影(GGO)体积、实变体积以及 GGO 与通气肺体积的比率。结果发现胸部 CT 定性定量分析联合血浆细胞因子是预测新型冠状病毒肺炎患者住院死亡和病情最严重程度的有力非侵入性工具。这将有助于对新型冠状病毒肺炎患者的分诊和管理未来的疫情。

Palmisano 等在一项包含 1469 名 COVID-19 患者的队列研究中发现，入院 72h 内胸部 CT 上显示的主肺动脉直径(MPAD)增大与患者住院死亡率的增加有关，MPAD≥31 mm 是 COVID-19 院内死亡率的独

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：周文(1997－)，女，河南南阳人，硕士研究生，主要从事胸部及心血管影像诊断工作。

通讯作者：夏黎明，E-mail：cjr.Xialiming@vip.163.com

立预测因子。Gresser 等采用 CE 认证的基于人工智能(AI)的算法(CAD4COVID, Thirona)对 COVID-19 重症 ICU 患者的入院胸部 CT 进行严重程度评分,发现与住院死亡率无显著相关,而序贯器官衰竭评估(SOFA)评分则与住院死亡率显著相关,在受试者操作特征(ROC)曲线分析中,入院时 SOFA 评分的曲线下面积(AUC)高于 CT 评分。表明晚期新型冠状病毒肺炎患者常常导致多器官受累,基于 AI 的胸部 CT 定量评估并不足以预测住院死亡率,应当包括多器官衰竭评估。

有研究发现影像学检查也可以提供肺功能相关信息。Chen 等前瞻性纳入了 90 名中重度 COVID-19 患者,在出院时接受 CT 扫描,并对整个肺和肺叶进行定量分析,随后在症状出现后 5 个月进行肺功能测试(PFT),发现超过三分之一的中度和重度 COVID-19 患者出现弥散功能障碍,多变量分析确定全肺平均肺密度(MLD)和左上叶 MLD 是恢复期肺弥散功能障碍的独立预测因子。Fonseca 等收集了 101 名轻度至重度 COVID-19 患者,均在康复后连续接受胸部 CT 和肺功能检查(PFT),结果显示一氧化碳弥散能力(DLCO%)下降是最常见的肺功能异常。DLCO 受损患者的胸部 CT 上出现网状阴影($P=0.003$)、支气管扩张($P=0.005$)和结构扭曲($P<0.001$)以及 CT 范围评分>5($P=0.006$)明显更为常见。COVID-19 患者恢复期的影像学检查在一定程度上可以预测肺功能。

低剂量放疗(LD-RT)是新型冠状病毒肺炎患者的治疗方式之一。Pena 等在一项小型研究中初步探讨了这种治疗方式对肺纤维化的影响。将研究对象根据是否接受 LD-RT 分为两组,对比两组在 LD-RT 当日(0 日)、+7 日和 4～7 个月后的胸部 CT 发现,LD-RT 可能是一种可行且耐受性良好的治疗方法,对 COVID-19 肺炎患者的影像学表现有所改善,并未加重纤维化程度。未来需要进一步随机、大样本试验来确定 LD-RT 治疗的患者是否会导致更高程度的肺纤维化。

人工智能/深度学习

现有的基于机器学习的肺结节分割方法多受到额外人工交互需求的限制。Song 等将更快的基于区域的卷积神经网络(Faster R-CNN)与广义交集(GIoU)和 Wasserstein 生成对抗性网络与梯度惩罚(WGAN-GP)相结合,提出一种基于混合损失的网络,用于在 CT 图像上实现端到端肺结节分割。与 U-net 相比,使用所提出的模型可以显著减轻过度拟合和假阳性结节的产生($P<0.001$)。人工交互和网络过度拟合的缓解将推动肺结节分割算法走向临床。

人工智能(AI)在肺结节的检测和评估方面有很大潜力,早期诊断肺恶性结节并准确预测预后具有重要的临床意义。Hong 等评估了 AI 辅助系统对放射科医师诊断肺恶性结节的影响,发现与两位读者单独诊断相比,引入 AI 诊断参考结果后,两位读者都表现出了在 AUC 方面的改善,表明人工智能辅助诊断可提高恶性结节的诊断符合率。Venkadesh 等将深度学习算法(DLA)整合到临床建立的用于评估首次 CT 筛查中肺结节恶性风险的 PanCan 模型中,发现新 DLA 模型使结节风险评分的计算更容易、主观性更低,且具有与 PanCan 模型相当的结节恶性风险评估性能。为改善基线 CT 扫描对肺癌的早期诊断,Wang 等基于 3 年随访的连续 CT 开发了一个深度强化学习(deep reinforcement learning, D-RL)新模型。在测试集中该模型诊断肺癌的 AUC 明显高于仅用基线扫描训练的 D-RL 模型的 AUC,表明用 3 年连续 CT 扫描训练的 D-RL 模型可以在基线 CT 检查中提前 1 年或 2 年诊断肺癌。Sollee 等纳入了活检或手术诊断为肺部恶性肿瘤的患者,手动分割了术前 FDG-PET/CT 检查的 1168 个病灶(793 个有进展),以 7:2:1 分配训练、验证和测试集,使用 CT/PET 输入训练的 CNN 模型来预测恶性肿瘤进展,结果显示术前 FDG-PET/CT 数据训练的 CNN 在预测肺恶性肿瘤总生存期(OS)方面具有良好的性能,与单独 CT 相比,PET 进一步提高了代谢信息的预测能力。

胸部 X 线(CXR)是临床常用的检查手段。Nam 等基于卷积神经网络利用 224268 张 X 线片开发和验证了从系列 X 线片中检测气胸、实变和胸腔积液间隔变化的深度学习算法(deep learning algorithm detecting interval changes, DLAD-IC)。该算法结合了 DLAD 和肺分割算法,可计算出每个异常的定位面积与总肺面积的比值,对三种异常病变的间隔变化的检测均有较好的效果,敏感度显著提高。DLAD-IC 通过提供异常的间隔变化信息有助于为急诊 X 线片提供更准确、更早的报告。Weiss 等使用了前瞻性癌症筛查试验中 40643 名无症状参与者的 147497 张胸部 X 线片,通过深度学习建立了 CXR 胸部年龄(chest-age)模型,并评估其在肺癌筛查合格个体和确诊肺癌患者中的预后价值。研究显示基于深度学习的胸部年龄显著提高了肺癌患者的生存预测,这与基线危险因素无关,且超出了实际年龄。

随着 CT 检查在全球肺癌筛查中的迅速增加,在扫描范围内自动检测和表征其他疾病是非常有必要的。Sxauer 等基于 CT 开发了一种深度 CNN 以实现检测、分割及量化胸腔积液的目的。该算法检测积液的敏感度和特异度分别为 99%和 98%,且显示了稳健

的分割性能。自动量化胸腔积液算法的应用将会极大改善临床工作流程。Fuhrman 等使用国家肺部筛查试验(NLST)中 865 张肺癌筛查 CT 图像,通过深度多实例转移学习方法开发一个诊断肺气肿存在的模型,其 AUC 为 0.93±0.04,具有很强的潜力。Batra 等试图将 AI 算法应用于常规胸部对比增强 CT 上以检测偶发肺栓塞(iPE),该算法的敏感度中等,但特异度高,阴性预测值达 99.7%,他们还发现既往手术引起的解剖学改变和边缘强化的转移病灶可能会导致分类错误,为后续算法性能的提高提供参考。偶发性肺栓塞与死亡率和发病率增加相关,检测 iPE 的 AI 算法将使医师和患者受益。

深度学习在图像重建方面有巨大价值。Kikuchi 等回顾性研究 30 例食管癌患者的增强双能 CT 图像,采用对比滤波反投影(FBP),自适应统计迭代重建(ASiR-V)和深度学习图像重建(DLIR)三种方法重建 50 keV 和 70 keV 单能图像,比较发现 DLIR 算法的图像整体质量、信噪比(SNR)和(CNR)明显高于另外两种方法,DLIR-70 keV 与 DLIR-50 keV 无显著差异。DLIR 图像质量最好(中位数评分 4～5 分),FBP-50 keV最差。DLIR 算法在双能 CT 上能提供最佳的胸廓图像质量。Yoo 等研究同样表明与其他常规重建技术相比,DLIR 在低剂量和超低剂量胸部 CT 的客观和主观分析中均显示出更好的图像质量。

为放射科开发深度学习(DL)模型可能会受到所需大量图像和标签的限制。迁移学习是一种有效的缓解策略,在大型数据集(通常是非医疗数据集)上对网络进行预训练,然后在较小的、针对特定任务的放射学数据集上进行微调。虽说是微调,但仍然需要＞100 k 图像以及大量的人力和计算资源。Sellergren 等将对比学习与监督学习结合起来,通过监督对比(SupCon)前训练中的迁移学习来降低这些要求。最终 SupCon 仅使用 64 张图像就能实现与最先进的 DL 模型相当的性能。这是一种使用小数据集进行预测建模的有前景的方法,在计算资源受限、数据有限或分布变化的情况下非常有用,如 COVID-19,在这种情况下,人群和治疗方法变化迅速。

Park 等收集了 16164 名在同一天进行 LDCT 和 PFT 的体检参与者,基于 GoogLeNet 的 I3D(inflated-3D)网络训练以回归方式预测 PFT 参数,例如 1 秒用力呼气量(FEV1)和用力肺活量(FVC)。同时在外部数据集中进行验证,显示该深度学习模型在容积胸部 CT 上预测 PFT 值性能较好,可作为肺功能低下患者分类的筛选工具。

导航支气管镜是一种比经胸穿刺活检更安全的肺结节取材方法。由 CT 图像重建的三维气管支气管气道路线图是支气管镜检查的前提。Wang 等基于 3D U-net 提出并验证了一个新的 DL 模型,通过惩罚低置信度的气道段并专注于细支气管训练,可以识别更多更细的细支气管(最高为 12 级)。同时具有自我注意机制的扩张卷积,可在更大区域提取形态特征,以区分真实气道和其他形状,如食道,保持 3D 气道重建的高总体准确性,可以比现有的自动算法更好地描绘复杂的气道树状结构。

影像组学

尽早识别早期非小细胞肺癌(NSCLC)术后复发高风险的患者有助于指导个体化治疗和随访方案的制定。Christie 等开发一种结合肿瘤和非肿瘤感兴趣区域的定量成像特征、定性特征和临床数据的多模态模型,以改善术后复发风险分层。他们分析了 135 名以手术作为主要治疗方式的早期 NSCLC 患者治疗前的数据集,在术前 CT 和 PET 上对肿瘤和瘤周体积、骨髓(L_3～L_5 个椎体)进行分割以提取放射组学特征,使用最小绝对收缩选择算子(LASSO)进行特征选择,最终纳入 14 个特征作为预测术后复发的主要特征。12 个特征为纹理特征(2 个 CT 肿瘤、6 个 CT 肿瘤周围、2 个 PET 肿瘤周围和 2 个 PET 骨髓),其余两个特征为癌症分期和患者年龄。结果发现肿瘤和非肿瘤区域纹理更异质的患者更容易复发,该模型在训练(n＝94,P＜0.005)和测试(n＝41,P＝0.01)队列中显著地将患者分为高风险组和低风险组。基于 CT 和 PET 上肿瘤和非肿瘤区域的影像组学模型在 NSCLC 复发风险分层方面优于仅临床分期模型,可帮助医生识别术后复发风险较高的患者。

Zhang 等回顾性纳入接受表皮生长因子受体酪氨酸激酶抑制剂(EGFR-TKI)治疗的 118 名 NSCLC 患者,在治疗前和第一次随访的非对比胸部 CT 提取肿瘤内和周围特征,此外还引入了单位时间(天)的百分比变化,发现与仅使用基线特征的影像组学模型相比,结合时间序列的组学模型在预测无进展生存期(PFS)方面的性能更优越,单位时间百分比变化的动态概念有望监测治疗反应并实现个性化管理。

超进展性疾病(HPD)是免疫检查点抑制剂(ICI)治疗后公认的肿瘤进展模式。然而,在治疗前确定 HPD 是否会发生的生物标记物尚未建立。Song 等纳入 196 名接受 ICI 单一治疗的进展期 NSCLC 患者,从基线前、基线中,到第一次随访期间至少接受 3 次 CT 扫描,共 621 个病灶使用肿瘤生长动力学(TGK)比率确定是否为 HPD。利用影像组学特征建立了 HPD 的预测模型,模型对肺、骨、淋巴结、肝脏 HPD 预测的 AUC 分别为 0.65、0.70、0.60、0.72。预测不同器官

HPD 的影像组学特征不同，反映了肿瘤间异质性和器官特异性微环境。该研究表明，利用影像组学特征预测 HPD 和了解 ICI 治疗后肿瘤进展的异质性有很大潜力。

Wu 等应用影像组学以实现预测肺腺癌组织学侵袭性的目的，回顾了 203 例亚实性结节（SSN）经手术病理证实的肺腺癌患者的 CT 图像，使用开源软件与三维结节体积手工分割提取影像组学特征，Logistic 分析发现 GLCM_Entropy_log10 的影像组学参数是肺腺癌组织学侵袭性的预测因子，其截断值预测侵袭性的敏感度和特异度分别为 84.8%和 79.2%。与常规 CT 形态学特征（结节大小和实性成分）和放射科医师相比，基于影像组学预测侵袭性模型的 AUC 值显然更高，可提供更好的诊断性能，可帮助临床医师在处理这类亚实性结节时作出决策。

肺癌筛查

肺部影像报告和数据系统（Lung-RADS）是临床常用的辅助 LDCT 肺癌筛查、指导标准化随访和管理决策的评分标准。Gu 等通过学习曲线表明无论放射科医生的分类，Lung-RADS 均适用于 LDCT 筛查研究，在社区肺癌筛查项目中，普通放射科医生可能表现得和胸部放射科医生一样好。Lung-RADS 目前不包括与纵隔或肺门淋巴结（MH-LNs）肿大相关的任何尺寸标准。Seo 等在 223 名初次 LDCT 有 MH-LNs 肿大（≥6 mm）的受试者的至少一年的随访研究中发现，淋巴结短轴长度是判断 MH-LNs 是否为恶性的最重要因素，短轴长度至少为 15 mm 的孤立纵隔或肺门淋巴结肿大可能提示肺 RADS 评分为 4X。其他特征（如形状、支气管炎、肺气肿）需要进一步研究以证实其相关性。实际临床中 Lung-RADS 4X 分类读者间差异很大，Lee 等利用 3D CNN 模型鉴别毛刺征和支气管充气征，DL 模型与经验丰富的放射科医生在 4X 分型（毛刺征和支气管充气征）方面具有可比性，高特异性有助于减少不必要的侵入性检查。

Lee 等根据荷兰-比利时肺癌筛查研究（NELSON）标准回顾性收集了 120 名在基线 CT 上有不确定结节的肺癌筛查参与者，并获得随访 LDCT，比较 Lung-RADS、NELSON 标准和放射科医生确定结节生长和诊断敏感度及特异度，发现与放射科医生的主观评价相比，NELSON 标准定义的结节生长具有更高的敏感度和更低的特异度，但放射科医生的主观评价在结节诊断上的敏感度明显高于其他两个标准。除了对结节生长的敏感度较低外，放射科医生的主观评价可以在后续 LDCT 中敏感地识别肺癌。

语义特征在肺结节分类中的诊断价值可以通过恶性肿瘤的似然比（LR）来比较和理解，以帮助放射科医生和提供者评估患者的肺癌风险。Wu 等评估和比较一列定义明确的语义特征的恶性程度的 LR，发现对恶性概率影响最大的语义特征是："小于 6 mm"，LR＋为 0.02（95%CI：0.01～0.09），"边缘光滑"，LR＋为 0.04（95%CI：0.01～0.09）；"毛刺"，LR＋为 28.7（95%CI：7.1～116.3）；"放射冠"，LR＋为 25.6（95%CI：3.5～187.5）；"侵犯胸膜或裂隙"LR＋为 18.4（95%CI：5.8～58.2）；"伪空化"LR＋为 12.3（95%CI：1.6～93.8）。标准化的语义特征 LR 库可以帮助管理结节恶性风险和预测性建模。

以往研究证明在基线低剂量 CT 筛查上发现的平均直径＜10 mm，豆状，椭圆形或半圆形（LOS）或三角形且边缘光滑的胸膜下实性非钙化结节（CP-NCN）不需要短期随访，建议进行年度筛查。那么，在年度筛查中新发生的 CP-NCN 是否适用相同的随访建议尚不可知。基于此，Ye 等纳入了在国际早期肺癌行动计划年度筛查扫描中 21 个新发生的 CP-NCN（肺癌）和西奈山早期肺和心脏行动计划中 56 个新发生的 CP-NCN（55 个良性），发现所有平均直径小于 10.0 mm、三角形或 LOS 形状且边缘光滑的 CP-NCN 均为良性，建议进行年度筛查，而不是立即采取进一步检查。

吸烟是肺癌的一个重要危险因素。Vliegenthart 等研究发现不同吸烟状况者的肺结节影像学表现有显著差异，不吸烟者肺结节的尺寸更小，非实性、不规则或不光滑结节比例更低，钙化结节比例更高。这项研究优化了从不吸烟人群中偶然发现的肺结节的处理，他们的结节通常偏向良性。

Chelala 等对 NLST 进行二次分析以确定肺癌筛查期间 6～10 mm 胸膜结节的恶性频率，并使用与 Lung-RADS 1.1 的裂周结节等效的结节分类方案向下分类。这项研究表明，当形态为良性时，6～10 mm 的胸膜结节的恶性潜能较低。将目前对裂周结节的处理外推到胸膜结节，4.9%的患者使用 Lung-RADS 1.1被降为 2 类。这将大大减少短期随访和假阳性结果。

肺癌相关

纵隔淋巴结转移（MLN）的准确评估对于治疗决策至关重要。Zhu 等在ⅠA 期 NSCLC 队列中比较了术前 CT 和 FDG-PET 预测 MLN 转移的敏感度和特异度。在 470 名患者中，部分实性（n＝63）、非实性（n＝23）及最大直径≤10 mm（n＝47）或诊断为典型类癌（n＝48）的实性 NSCLC 患者均未发生 MLN 转移，其余 297 名 11～30 mm 实性 NSCLC 患者中，7 名（2.4%）有 MLN。使用 CT 最大短轴 MLN 直径预测

实体 NSCLC 中 MLN 的 AUC 为 0.62，使用任何 MLN 中的最高 SUVmax 的 AUC 为 0.58。预测 11～30 mm 实性 NSCLC 的 MLN 的最佳临界值是 CT 最大短轴直径≥18.9 mm 和最高 SUVmax≥11.7，二者各自的 AUC、敏感度和特异度分别是 0.62、14.3%、100%和 0.58、14.3%、99.7%，未来研究应着重提高敏感度。

目前指南对中央型肺癌的定义仍不明确，Kim 等基于胸部 CT 的 13 种定义，对两个回顾性队列进行了中央型肺癌与隐匿性淋巴结转移的相关性评估。以病理 N 分期作为结局进行单变量和多变量有序逻辑回归分析。最终在不同观察者间和数据集中确定了三个有较强稳健性的定义：定义 7（起源于中线的同心线，内三分之一，内侧缘），定义 10（基于位置指数的内三分之一，中心），以及定义 12（基于位置指数的内三分之一，内侧缘）。然而，这三种定义的敏感度和阳性预测值均低于 50%，需要一种预测模型来确保对隐匿性淋巴结转移识别的高敏感度。

大多数肺腺癌（ADC）都是混合的组织学类型，而且具有相同最主要组织学类型的肺腺癌的实际预后差异很大。Choi 等在一项研究中确定了 ADC 的次要组织学类型对预后分层的价值。研究表明当最主要组织学类型为中级别时，三个次要组织学亚型之间的生存曲线有显著差异（$P=0.004$；低级别，贴壁型；中级别，腺泡型和乳头状型；高级别，微乳头型和实体型）。次要组织学类型为高级别的复发风险是低级别组的 4.2%，此外，术前肿瘤的平扫 CT 值和 SUVmax 可用于预测非主要但高级别的组织学类型。这项研究提示我们预测肿瘤恶性程度和制定治疗方法不应仅依赖于最主要的组织学类型，次要组织学类型也可发挥意想不到的作用。

Koike 等对 507 例确诊为肺腺癌患者的术前薄层 CT 进行回顾性分析，根据结节类型分为实性结节、部分实性结节、异质性磨玻璃结节（GGN）和纯 GGN 组。发现异质性 GGN 均仅在术后ⅠA 期患者中发现，异质性 GGN 组术后无原发性肺腺癌复发或死亡。与部分实性结节相比，异质性 GGN 与更长的无病生存期（DFS）显著相关（$P=0.042$）。然而异质性 GGN 和部分实性结节的总生存期（$P=0.139$）没有显著差异。基于 IASLC/ATS/ERS 肺 Ad 新分类的病理诊断可见异质性 GGN 组浸润性腺癌比例较低，微浸润性腺癌和原位腺癌比例高于部分实性结节组。

Murota 等探讨原发性囊性空洞型肺癌（CCLC）的 CT 和 FDG-PET 表现，CCLC 以腺癌（AD）最多见，尤以 GGO 和多房间隔多见。在实性病变中，多房和间隔的存在也同样常见。AD 在 PET 上的 SUVmax 明显低于鳞癌（SCC），但不同实体病变的 SUVmax 不同。这可能有助于鉴别组织学表现。

Hwang 等利用 5000 张癌症患者的胸部 CT 开发一种基于深度学习的计算机辅助检测（CAD）系统以识别肺转移。在初步评价中，与放射科医生相比，CAD 诊断肺转移的敏感度（82% vs. 92%，$P<0.001$）和 PPV（25% vs. 38%，$P<0.001$）明显低于放射科医生。有趣的是，在 CAD 辅助下的第二次检查中，放射科医生多发现了 64 个结节，其中 7 个（11%）是真正的转移。在 CAD 辅助下放射科医生发现肺转移的敏感度（95%）显著提高（$P=0.01$），而 PPV 下降（38%降至 35%，$P<0.001$）。基于深度学习的 CAD 可以在日常实践中帮助放射科医生发现可能忽视的肺转移，这对临床医生完全切除肺转移病灶十分重要。

光子计数探测器

Booij 等评估临床双源光子计数检测器（photon counting detector，PCD）CT 在图像质量（IQ）和肺部结构可视化方面的改善。与同一患者传统能量积分检测器（conventional energy-integrating detector，EID）CT 图像比较发现，PCD-CT 获得的胸部 CT 扫描图像质量评分较高，两名观察人员在 PCD-CT 上对最小的支气管分区可见性评分更好。与 EID-CT 相比，PCD-CT 可成为临床无对比增强胸部 CT 检查的首选，尤其适合小气道疾病。Inoue 等探讨了 PCD-CT 诊断普通间质性肺炎（UIP）的价值，相比于 EID-CT，PCD-CT 可提供更好的的图像质量，从而提高了读者对网状结构、马赛克图案和 GGO 的诊断信心，改善 UIP 的影像诊断。

Dunning 等对比了传统能量积分检测器（EID-CT）和研究性全身 PCD-CT 在肺癌筛查中对结节体积定量的准确性。二者分别在 0.3、0.6 和 1.2 mGy 三个剂量水平下，对附着在拟发现人胸部模型中 16 个低对比度和高对比度（630 HU 和 100 HU）、三种尺寸（直径 5、8 和 10 mm）以及两种形状（圆形和星形）的肺结节进行扫描，使用半自动分割工具（MM Oncology，Siemens）测量所有结节的体积和每个图像序列中的噪声。结果显示与 EID-CT 相比，PCD-CT 在三个剂量水平下将图像噪声降低了 36%、35% 和 45%，同时在降低剂量的情况下保持了对结节体积测量的准确性。这为低剂量肺癌筛查中结节体积的测量提供了一种新手段。

单能 CT 与双能 CT

Fang 等评价了自适应统计迭代重建-VEO（ASIR-V）算法在低辐射剂量下对能谱增强 CT 胸主

动脉图像质量的影响。在 70 keV 单能量水平下，分别采用 20%、40%、60%和 80%迭代重建水平进行 CT 重建。四组不同图像重建组的胸主动脉图像噪声(SD)、SNR、CNR 差异有统计学意义($P<0.05$)。20%、40%、60%和 80%迭代重建水平各组胸主动脉 SD 分别(29.35±3.65) HU、(23.29±2.57) HU、(17.53±1.61) HU 和(12.44±1.10) HU。60%和 80% ASIR-V 主观评分分别为 4.48±0.74 和 4.03±0.59，所有其他迭代重构水平的主观得分均在 4.0 分以下。对于胸主动脉血管疾病，能谱 CT 单能扫描结合 60%迭代重建权重可显著改善血管管腔的图像质量，为临床应用提供更有效的信息。

Martine 等利用双能 CT(dual energy，DECT)评价系统性硬化病(systemic sclerosis，SSc)患者的肺灌注。101 名 SSc 患者在第三代双源 CT 系统(Force，Siemens Healthineers)上进行扫描并重建了形态学和灌注图像。随后两个月内接受了肺功能检查。结果显示 DECT 在形态学方面可提供标准 HRCT 扫描的补充信息，同时可描述正常或肺实质轻度浸润的 SSc 患者的灌注变化。形态学和灌注之间具有临床相关的互补性，表明双能 CT 在患者管理中可发挥更大的作用。

Liedekerke 等通过对比度增强双能 CT 发现，与低剂量肺部 CT 扫描相比，DECT 可提供 COVID-19 病灶中碘和水含量的更多信息，COVID-19 患者的正常肺组织、毛玻璃样混浊和实变存在不同浓度的碘和水，毛玻璃混浊和实变处的碘浓度与 CT 严重程度评分呈正相关。COVID-19 主要表现不仅是肺炎，还有凝血障碍。Martine 等提供了严重 COVID-19 感染患者住院后 3 个月可检测到的肺血管异常的初步数据。他们对有呼吸道残留症状的患者进行专科随访，共对 55 人进行了 DECT 血管造影检查，并重建了灌注图像(肺 PBV)。DECT 显示了 5.4%的患者有非梗阻性近端血栓形成，65.5%的患者有灌注异常提示广泛的微血管病变，灌注增加区域与残留的肺炎异常相匹配。

肺动脉高压(PH)是一种高发病率和高死亡率的疾病，临床准确诊断仍具有挑战性。Gertz 等纳入 162 例经右心导管(RHC)证实为符合 Nice 分类定义的不同病因的 PH 患者和 20 例侵入性检查排除 PH 的患者，均在光谱检测器 CT(SDCT)上接受了 CT 肺动脉造影(CTPA)，根据碘含量自动分割正常肺区和灌注不良肺区，并进行自动、虚拟的、非对比的肺气肿量化。计算相应体积、直方图特征和 SkewnessPerfDef -肺气肿指数(δ 指数)，发现 SDCT 衍生的肺灌注图和肺实质特征自动化分析有助于 PH 的诊断，还允许对 PH 亚型进行自动化的、独立于读者的分类，并为非侵入性严重程度预测产生超出既定标志物的额外价值，特别是在毛细血管前 PH 的范围内。

慢性阻塞性肺疾病

Ezponda 等纳入 220 名慢性阻塞性肺疾病(COPD)患者作为病例组，并按年龄、性别、BMI 和体表面积(BSA)匹配的 58 名患者作为对照组，在低剂量胸部 CT 测量了两组的腰大肌密度(PsD)，发现病例组的 PsD 低于对照组(40.5 vs. 42.5，$P=0.045$)，Cox 比例风险分析显示年龄和 CT 评估的 PsD 是与全因死亡率独立相关的变量。这表明轻度至重度气流受限的 COPD 患者，可以将腰大肌密度作为胸部常规 CT 扫描测量的目标，为临床医生提供重要的 COPD 预后信息。Nam 等利用 CXR 和简单的临床信息，开发并验证了一种基于深度学习的 COPD 患者生存预测模型(DLSP)。DLSP 预测 COPD 患者 5 年生存率 AUC 为 0.710～0.814，在三个外部验证队列中均显著高于 FEV1、年龄、BMI 和 COPD 特异性临床指标(BODE、CAT 和 SGRQ)。

Wada 等对 1 周内接受肺功能测试(PFTs)的 COPD 患者进行了吸气和呼气 CT 检查，测量了左右膈脚在肠系膜上动脉口水平的短轴、长轴和横截面积(CSA)，并测定呼吸引起的膈脚大小变化率(ROCC)。结果显示双侧膈脚的短轴和 CSA 越小，ROCC 越大，PFTs 结果越好，提示膈脚可作为 COPD 的一项生物标志物，用胸部 CT 检查 COPD 患者的支气管和肺部病变时，可通过测量膈脚以评估肺功能。

COPD 亚型与处方药之间的关系尚不明确，对患者的治疗处方主要是基于患者当前症状、先前处方结果的患者状态以及呼吸内科医生的经验。Yang 等在一项初步研究中利用胸部 CT 图像和肺功能测试建立 COPD 患者用药预测模型。他们获取 2000 名 COPD 患者的处方药信息、肺功能检查结果(如 DLCO、FEV1、TV、TLC 等)和胸部 CT 数据(如肺气肿指数、气道厚度、气道长血管、体积、胸大肌体积等)，并进行预处理转换为时间序列数据，基于 CNN-LSTM 开发了用于预测指导患者用药的机器学习模型。模型的平均准确率和损失值分别为 0.8523 和 0.1536。在进一步研究中提供更大、更密集的数据时，模型预测的性能可能会显示出更好的结果，未来有望准确指导患者当前状态应该服用什么药物。

Choi 等在一项包含健康人、哮喘、COPD 和 IPF 的人群中，基于定量计算机断层扫描(QCT)探讨了环境颗粒物(PM)暴露对肺结构和功能改变的影响。最高暴露组全肺高衰减面积百分比(HAA%)显著升高，局部肺平均扩张(J)显著降低($P<0.05$)，归一化气道直径、多区域气道截面圆度和归一化壁厚明显小于最

小暴露组($P<0.05$)。在每种疾病类型中,PM 暴露与多种 QCT 特征之间也发现了显著的相关性。

肺弥漫性疾病

间质性肺病(ILD)是抗合成酶综合征(ASyS)发病率和死亡率的主要决定因素。Wu 等回顾性分析了 47 例 ASyS-ILD 患者的 CT 演变以及与血清学生物标志物和预后的关系。31 名患者有抗 Jo1 抗体,而 16 名患者没有,影像学类型和抗体类型之间没有显著相关性。最常见的初始影像学模式是非特异性间质性肺炎(NSIP)和机化性肺炎(OP)。在 46 个月的中位随访时间内,半数患者出现了 ILD 模式。最常见的模式变化是从 OP、NSIP-OP 重叠到纤维化 NSIP。纤维化 NSIP 或常见间质性肺炎(UIP)模式通常不会进一步发展或演变。初次 CT 时 GGO 占优势模式与生存率增加相关。

特发性肺纤维化(IPF)是常见的间质性肺炎(UIP)类型。胸膜下纤维化伴结构扭曲是 UIP 的特征性组织学表现。YASUDA 等纳入首次就诊并连续接受三次年度 CT 扫描的 IPF 患者,采用 Ziostant2 软件(Ziosoft, Inc.)对初始和随访 CT 图像进行变形配准,计算肺血管和周围支气管的三维平均位移(3D-AD)。结果显示通过连续 CT 图像的可变形配准的 3D-AD 彩色图可以帮助可视化 IPF 患者肺部结构扭曲的进展。

Nagatani 等通过动态通气计算机断层扫描(DVCT)分析了特发性肺纤维化/普通性间质性肺炎(IPF/UIP)患者峰周吸气期整体肺容积变化与用力肺活量百分比(%FVC)的关系,发现吸气持续时间相对较短,吸气峰期变化与%FVC 呈正相关,反映了胸膜下纤维化及其进展与 IPF/UIP 的%FVC 降低平行。

Iwasawa 等评估超高分辨率计算机断层扫描(U-HRCT)对纤维化过敏性肺炎(fHP)的诊断性能,与传统正常分辨率模拟(NR-sim)图像相比,U-HRCT 整体图像质量优于 NR-sim 图像质量,可显示支气管扩张肺段的中位数明显更高。fHP 诊断的 AUC 从 NR-sim 图像中的 0.692 显着增加到 U-HRCT 图像中的 0.794。U-HRCT 可以清晰地显示外周支气管扩张,提高传统 CT 对纤维化过敏性肺炎的诊断性能。

Zhao 等探讨了深度学习重建改善间质性肺病(ILD)图像质量同时降低辐射剂量的可行性。前瞻性纳入 50 例 ILD 患者行 HRCT 和 LDCT 扫描,HRCT 图像采用 AIDR3D 标准重建,LDCT 图像采用 Advanced Intelligence Clear-IQ Engine(AiCE)、肺/骨、轻度/标准/强设定重建。结果显示 LDCT 的平均辐射剂量减少到 HRCT 的 1/3。低剂量扫描所有重建图像的图像噪声约为 HRCT 的 33.4%～91.5%,SNR 提高到后者的 1.1～3 倍($P<0.0001$)。在所有重建的 LDCT 图像和 HRCT 图像之间,整体图像质量、条纹伪影、正常特征(裂隙、近端支气管和血管、外周支气管和血管、胸膜下血管)和异常特征(网状结构、支气管扩张和支气管扩张)的可视化方面无显著差异。AiCE(肺,强设置)有望成为未来 ILD 患者 LDCT 扫描的首选重建方案。

弥漫性肺淋巴管瘤病(DPL)是一种罕见的胸部先天性淋巴管发育畸形。Qi 等回顾性分析了 38 名经手术证实为 DPL 的患者的胸部 CT,旨在提高放射科医师对 DPL 的诊断和鉴别。所有患者均出现纵隔溺水征(MDS),典型影像学表现为纵隔全区域弥漫均匀(32/38,84%)或不均匀(16%)水样或粘液密度(32/38,84%),无气管和大血管移位和变形。MDS 是 DPL 的重要表现之一,对肺间质增厚和乳糜胸的早期诊断具有重要意义。MSCT 淋巴管造影显示沿纵隔、双侧肺门和支气管血管束分布的对比剂(超液体碘油)广泛沉积和渗漏,提示淋巴管生成、淋巴管扩张和反流。其他伴随发现包括胸导管(100%)和右侧淋巴管阻塞(12/38,32%)、支气管纵隔干扩张(6/38,16%)、支气管血管束和小叶间隔增厚(35/38,92%)、弥漫性不均匀 GGO (35/38,92%)、乳糜胸或胸膜外软组织增厚(30/38,79%)以及腹部和骨骼中的异常淋巴管(9/38,24%)。

暗场 X 射线成像

Gassert 等纳入 40 例无肺部疾病史且胸部 CT 扫描肺部表现正常的受试者,使用新型临床 X 线暗场模型进行成像,同时获取常规胸片和暗场胸片。他们发现通气良好的肺组织发出强烈信号,而周围的骨组织和软组织则很低或没有信号。肺组织暗场信号平均为 2.53±0.44 /m。暗场总信号与肺泡数量呈极显著相关($r=0.61$, $P<0.001$),与性别、年龄、体重、身高无关。因此定量暗场系数可以作为一种新型影像学生物标志物,用于肺功能的诊断评估。这是首次描述健康受试者 X 射线暗场图像的定性和定量特征,可能会提高现有的肺部成像技术以实现肺部疾病的早期诊断,为今后的研究提供参考。

胸部磁共振成像

目前胸部检查的主要手段仍旧是 X 线片和 CT,但磁共振具有无辐射、多序列多参数、良好的软组织分辨力、功能学成像等优点,随着技术不断发展应用前景十分广阔。与标准或低剂量 CT 相比,肺 MR 超短回波时间成像(UTE)已被用于结节检测或结节亚型分

类。然而，尚未明确 UTE 肺 MRI 在 Lung-RADS 评估中的能力。Ohno 等进行的一项研究表明 UTE 肺 MRI 与标准或减少剂量薄层 CT 在结节检测和 Lung-RADS 分级评估方面具有相当的能力。Zhang 等同样以胸部标准剂量 CT 作为参考标准，调查了自由呼吸径向 3D 脂肪抑制 T_1 加权梯度回波（r-VIBE）序列扫描检测肺部病变并显示病变轮廓的价值。r-VIBE 序列能正确检测到 94.8%的肺结节，在评估分叶、毛刺、血管集聚、气泡样衰减、空化和纵隔淋巴结肿大时的敏感度为 81.8%、93.3%、71.4%、81.8%、100% 和 88.2%，与标准剂量 CT 的一致性显著（$0.605 \leqslant K \leqslant 1.000$，$P<0.0001$）。

Yang 等应用血氧水平依赖磁共振成像（BOLD MRI）评估了 15 名Ⅰ～Ⅲ期 NSCLC 患者因不能手术而接受立体定向身体放射治疗（SBRT）前后肿瘤氧合的变化。所有 BOLD MRI 在 Philips Ingenia CX3T 扫描仪上使用动态 T2 * 映射序列和全身 dStream 线圈采集。结果发现 SBRT 导致非小细胞肺癌病灶的 BOLD 反应显著降低（$-5.9 \pm 0.1\%$，$P=0.03$）。治疗诱导的肿瘤氧合变化与治疗前 BOLD 反应水平密切相关（$r=-0.74$）。BOLD MRI 可检测到治疗后肿瘤氧合的增加，这种反应是肿瘤特异性的，在治疗前缺氧的病变中更为明显。它也发生在辐射引起的水肿和任何实质性的肿瘤灌注或通透性改变之前。这项研究结果证明了 BOLD MRI 监测 NSCLC 患者对放疗早期反应的可行性，并提示其可能比 DWI 和动态对比增强 MRI 更敏感。

4D 血流 MRI 是研究血流动力学的新技术。β 受体阻滞剂（BB）治疗二叶式主动脉瓣（BAV）的益处尚未在临床试验中得到证实。Pathrose 等使用 4D 血流 MRI 技术在一项纵向研究中发现 BAV 患者的主动脉血流动力学在开始 BB 治疗后并没有发生显著改变，BB 对 BAV 患者的益处需进一步研究。

Mazzaro 等探讨了基于傅立叶分解 MRI（FD-MRI）的肺灌注图对囊性纤维化（CF）患者呼吸道恶化（RTE）的诊断价值，研究显示 FD-MRI 灌注图评分具有良好的重复性，可有效区分呼吸道恶化的 CF 患者。它在检测治疗后的变化方面也很有用，证明与肺活量测定参数有良好的相关性，提供功能信息，避免了对比剂和电离辐射。

胸部血管

非动脉粥样硬化性非动脉瘤性主动脉血栓（NANAAT）是必须认识到的重要影像学诊断。Marquis 等回顾了 28 名 NANAAT 患者的临床和影像资料，发现 50%的 NANAAT 患者存在高凝状态，NANAAT 最常见于胸降主动脉，但 22%的患者在升主动脉中发现。在药物治疗失败或需要血管内或开放性手术治疗的患者中，12/13（92%）有带蒂外观，表明这种结构可能需要更积极的治疗。

肺动脉高压（PH）是一种异质性、无法治愈的疾病，未经治疗的生存率低于大多数癌症。PH 中 CT 肺实质疾病模式的预后意义尚不清楚。Dwivedi 等纳入了 335 例特发性肺动脉高压（IPAH）和 325 例继发于慢性肺部疾病的肺动脉高压（PH-CLD）患者，发现蜂窝状（HR 2.79）、纤维化（HR 2.38）、肺气肿（HR 2.09）和肺气肿合并纤维化（CPFE，HR 2.20）是死亡率升高的显著不良预测因子（$P<0.001$），纤维化和肺气肿的预后影像与其严重程度成比例。而磨玻璃、小叶中心磨玻璃是显著的保护因子。

（收稿日期：2022-01-15）